



Universidad  
Zaragoza

# Trabajo de Fin de Grado

Análisis de la regeneración vegetal  
post-incendio en áreas con tratamientos  
mediante imágenes Sentinel-2.

Autor:

Sandra García Gil

Director:

Fernando Pérez Cabello

Grado de Geografía y Ordenación del Territorio

Facultad de Filosofía y Letras

Universidad de Zaragoza

Curso: 2018-2019



**Resumen:** Los incendios forestales constituyen un grave problema ambiental debido a la destrucción y alteración de los ecosistemas forestales. En el año 2015, en el municipio de Luna (Zaragoza), se produjo un incendio que afectó a 14.000 hectáreas. Tras el suceso se aplicaron diferentes actuaciones y tratamientos post-incendio que son objeto de análisis en este trabajo. A través de los datos obtenidos mediante índices espectrales, aplicados sobre imágenes Sentinel-2, se evalúa la regeneración vegetal en cinco momentos (variación fenológica) a lo largo de 2018 y se analizan las interacciones con otros factores ambientales (formación vegetal, altitud, exposición y pendiente topográfica, sombra). En términos generales, los mejores resultados se relacionan con aquellos tratamientos aplicados para evitar la erosión (*fajinas*) y en los que se han realizado apeos para la extracción de madera quemada con fines comerciales, aunque con resultados desiguales en función del Monte de Utilidad Pública en los que se planificaron dichas actuaciones.

**Palabras clave:** incendio forestal, actuaciones post-incendio, imágenes Sentinel-2, índices espectrales, regeneración vegetal.

**Abstract:** Forest fires are a serious environmental problem due to the destruction and alteration of forest ecosystems. In 2015, in the municipality of Luna (Zaragoza), a fire occurred that affected 14,000 hectares. After the event, different post-fire actions and treatments were applied that are the subject of analysis in this work. Through the data obtained by spectral index, applied on Sentinel-2 images, vegetal regeneration is assessed in five moments (phenological variation) throughout 2018 and interaction with other environmental factors (vegetal formation, altitude, exposure and topographic slope, shade) are analyzed. In general terms, the best results relate to those treatments applied to prevent erosion (*fajinas*), and where sticks have been made for the extraction of burnt wood for commercial purposes, although with uneven results depending on the Public Utility Mount in which these actions were planned.

**Key words:** forest fire, post-fire treatments, Sentinel-2 images, spectral index, vegetal regeneration.

# Índice

---

1. Introducción .....	4
2. Objetivos.....	8
3. Estudio de la zona.....	9
3.1 Localización de la zona de estudio .....	9
3.1.1 Características climáticas de la zona .....	10
3.1.2 Características de la vegetación de la zona .....	11
3.2 Características del incendio y tratamientos aplicados .....	13
3.2.1 Características .....	13
3.2.2 Severidad del incendio .....	16
4. Materiales y métodos.....	17
4.1 Materiales .....	17
4.2 Metodología.....	20
4.2.1 Tratamiento de las imágenes .....	21
4.2.2 Generación de la base de datos .....	23
4.2.3 Análisis estadísticos aplicados .....	24
5. Resultados .....	25
5.1 Distribución de los valores promedio de los índices espectrales .....	26
5.2 Distribución interanual de los valores de los índices espectrales .....	31
5.3 Interacciones con valores ambientales .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6. Consideraciones finales y conclusion.....	40
7. Referencias .....	42
8. Anexos.....	44

# 1. Introducción

Los incendios forestales constituyen un gran problema de degradación de los sistemas forestales, con importantes impactos tanto a nivel medioambiental como socioeconómico.

Desde el año 1968, momento en el que empezaron a registrarse sistemáticamente la estadística sobre los incendios, se ha identificado una tendencia creciente en la frecuencia y gravedad de estos eventos, si bien, en los últimos años se está observando una disminución del número total de siniestros. (Datos hasta 2015, año del incendio de luna) (CCINIF, 2015). En España cada año arden 116.000 Ha, esto supone que en los últimos 20 años haya ardido el 25% de la superficie forestal total.

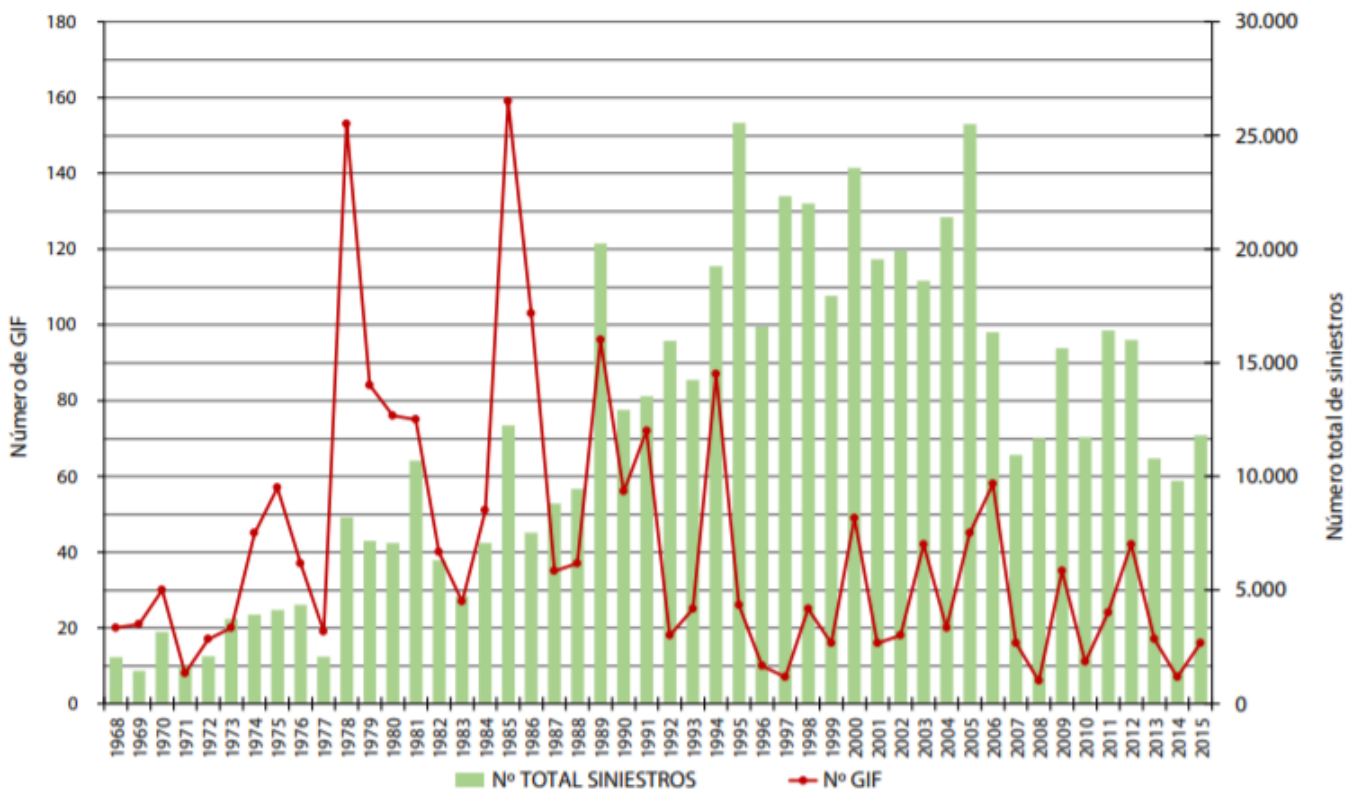


Figura 1: Evolución de los grandes incendios, 1968-2015 (CCINIF, 2015)

La mayor parte del territorio español, en el que se incluye Aragón, tiene unas características climáticas propias de los países mediterráneos, con temperaturas secas y altas, sobre todo en los meses de verano. Esto hace que España sea uno de los países de la unión europea más afectados por los incendios forestales (Ruano, 2013).

Desde la comunidad científica siempre se ha tenido un especial interés por comprender el comportamiento del fuego, su intensidad, las características de las áreas afectadas, o la capacidad de regeneración de la vegetación. La principal consecuencia de los incendios forestales es la pérdida de la vegetación y del componente orgánico del suelo

Tras el incendio, las características del terreno afectado y la intensidad/severidad del fuego condicionan los procesos de regeneración vegetal. La vegetación afectada presenta diferentes estrategias reproductivas. Existen ciertas especies que son capaces de regenerarse de forma natural tras un incendio, debido a sus bancos de semillas tienen la capacidad de sobrevivir a las altas temperaturas, otras pueden rebrotar de la propia planta tras el fuego, protagonizando procesos de autosucesión vegetal *Guillem, et al., (2017)*. Esto se debe a que la mayoría de las formaciones forestales en el ámbito mediterráneo tienen una gran capacidad de adaptarse al fuego, lo que supone que la vegetación afectada por el fuego juega un gran papel en la regeneración forestal a corto y medio plazo (*WWF, 2014*).

Las actuaciones post-incendio deben priorizar la conservación del suelo y evitar la pérdida de agua a través de la escorrentía, además, se debe apostar por la regeneración de los bosques de forma natural y de especies autóctonas.

El suelo sufre unos cambios físicos que pueden tener consecuencias irreparables. Para paliar estos problemas se llevan a actuaciones y tratamientos a corto plazo, para proteger el suelo de los agentes externos. Entre estas actuaciones podemos destacar por su profusa utilización en las zonas quemada, la creación de fajinas y la siembra de herbáceas y arbustivas, para minimizar los fenómenos de escorrentía superficial y la degradación y pérdida del suelo.

Dentro de las medidas de restauración hídrico-forestal, otro de los objetivos que se plantean a la hora de aplicar estas actuaciones, es la propia regeneración forestal de forma natural. Para ello se lleva a cabo un conjunto de actuaciones a medio plazo (de 1 a 3 años), que consiste en la realización de tratamientos silvícolas como podas, desbroces, así como la eliminación de los restos de la quema, para facilitar la regeneración natural. De esta manera se abre paso para la regeneración natural de la zona quemada.

Si la vegetación natural no consigue recuperarse en los siguientes 3 años, se ponen en marcha actuaciones de repoblación y siembra tanto de especies arbustivas y herbáceas como de arbóreas. Se intenta priorizar la replantación de vegetación autóctona, pero en muchos casos se opta por especies que crecen fácilmente y se adaptan a diferentes características del terreno, como es el caso del pino carrasco (*Pinus halepensis*) (*WWF, 2014*).

Con el paso del tiempo se debe comprobar si los tratamientos propuestos en la zona afectada han dado los resultados esperados. Sin embargo, no siempre se realizan de manera sistemática y exhaustiva, con lo que en muchas ocasiones no se conoce el alcance y los beneficios o las complicaciones derivadas de la aplicación de los diferentes tratamientos. Las imágenes de satélite y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), debido a la resolución espacio-temporal de sensores multiespectrales que llevan a bordo, ofrecen la posibilidad de comprobar la evolución de la vegetación en las zonas tratadas, con lo que pueden utilizarse como herramientas para realizar diagnósticos y motorizar los resultados de la aplicación de medidas para la restauración de las zonas quemadas (*Chuvieco, 2009*).

Además, el tratamiento de imágenes de satélite y los SIG permiten manejar grandes cantidades de información, facilitando los análisis de componentes espacio-temporales, como el que se pretende con este proyecto. Estas herramientas se utilizan para comprobar la eficacia de los diferentes tratamientos post-incendio que se hayan llevado a cabo en el área de estudio. Además, junto al análisis y control de los resultados de cada tratamiento en términos de recuperación vegetal, se puede analizar el papel desempeñado por otros factores relacionados con las características del medio afectado (parámetros topo-morfológicos, vegetación previa, etc.)

Los diferentes tratamientos que se aplican tras el fuego pueden tener una gran relevancia en la minimización de los efectos del fuego, pudiendo repercutir en las características biológicas de la zona.

La zona elegida para la realización de este estudio, es el área afectada por el incendio que se produjo el 4 de julio de 2015, a las 16:34, en el municipio de Luna en la comarca de las Cinco Villas (Aragón). Este incendio se extendió por los municipios de Orés, Asín, Uncastillo, Ejea de los Caballeros y Biota, afectando un total de casi 14.000 hectáreas (*Gobierno de Aragón, 2015*). La razón por la que se ha elegido este incendio se relaciona con la facilidad a la hora de recopilar la información relativa a las actuaciones post-incendio, básicamente proporcionados por el Servicio Provincial de Zaragoza (Gobierno de Aragón) y por la proximidad en el tiempo de dicho incendio y la amplia cobertura de imágenes Sentinel que posee esta zona ubicada en la comarca de las Cinco Villas.

En la zona del incendio se ha intervenido con diferentes tratamientos post-incendio desde el año 2015, dependiendo del sistema de tenencia de los montes afectados. Este proyecto, pretende a través de la teledetección y los SIG, saber cuál de los tratamientos ha obtenido mejores resultados, teniendo en cuenta las características físicas del terreno. En este sentido, no todos los tratamientos funcionan de la misma manera tras su implantación, ya que las condiciones de la zona en la que se aplican (pendiente topográfica, vegetación anterior, altitud, exposición al sol, etc.), pueden alterar los objetivos de las actuaciones.

Este estudio tiene como objetivo fundamental, determinar qué tratamiento ha supuesto un mayor desarrollo de la vegetación, medida a partir de índices espectrales, y que papel han jugado las condiciones físicas de los lugares en los que se han aplicado dichas actuaciones post-incendio. Los resultados podrían tener una clara componente aplicada, al utilizarse en la articulación de directrices de gestión forestal en zonas quemadas.



## 2. Objetivos

---

El objetivo de este TFG es conocer y valorar los resultados, en términos de regeneración vegetal, de la aplicación de diferentes actuaciones en el incendio forestal de Luna (provincia de Zaragoza) de 2015, mediante la utilización de índices espectrales derivados de imágenes Sentinel. Una serie de objetivos específicos permiten la obtención del principal:

- Comprobar la magnitud de la regeneración vegetal mediante índices espectrales en los diferentes tratamientos post-incendio aplicados.
- Conocer las características físicas de la zona que ha sufrido el incendio y cómo éstas afectan al desarrollo de los diferentes tratamientos post-incendio.
- Valorar la evolución interanual que experimenta la vegetación que coloniza las zonas en las que se han aplicado tratamientos postincendio.
- Plantear medidas de gestión en zonas quemadas en función de los tratamientos y sus interrelaciones con otros factores tales como la pendiente, la vegetación pre-incendio, el clima...

## 3. Estudio de la zona

### 3.1 Localización de la zona de estudio

Esta zona en la que se produjo el incendio se encuentra situada en la comarca de las Cinco Villas, provincia de Zaragoza, principalmente se desarrolló en el municipio de Luna, pero también afectó a otros municipios de la comarca como Orés, Asín, Uncastillo, Ejea de los Caballeros y Biota. Esta zona se encuentra en el somontano pirenaico, limitando por el norte con el Pirineo Aragonés y por el sur con la Depresión de Ebro. La altitud media de la zona es de 580 m.s.n.m y oscilan entre los 210 y los 775 en la Sierra de Pedrosas. (Gelabert, 2017)

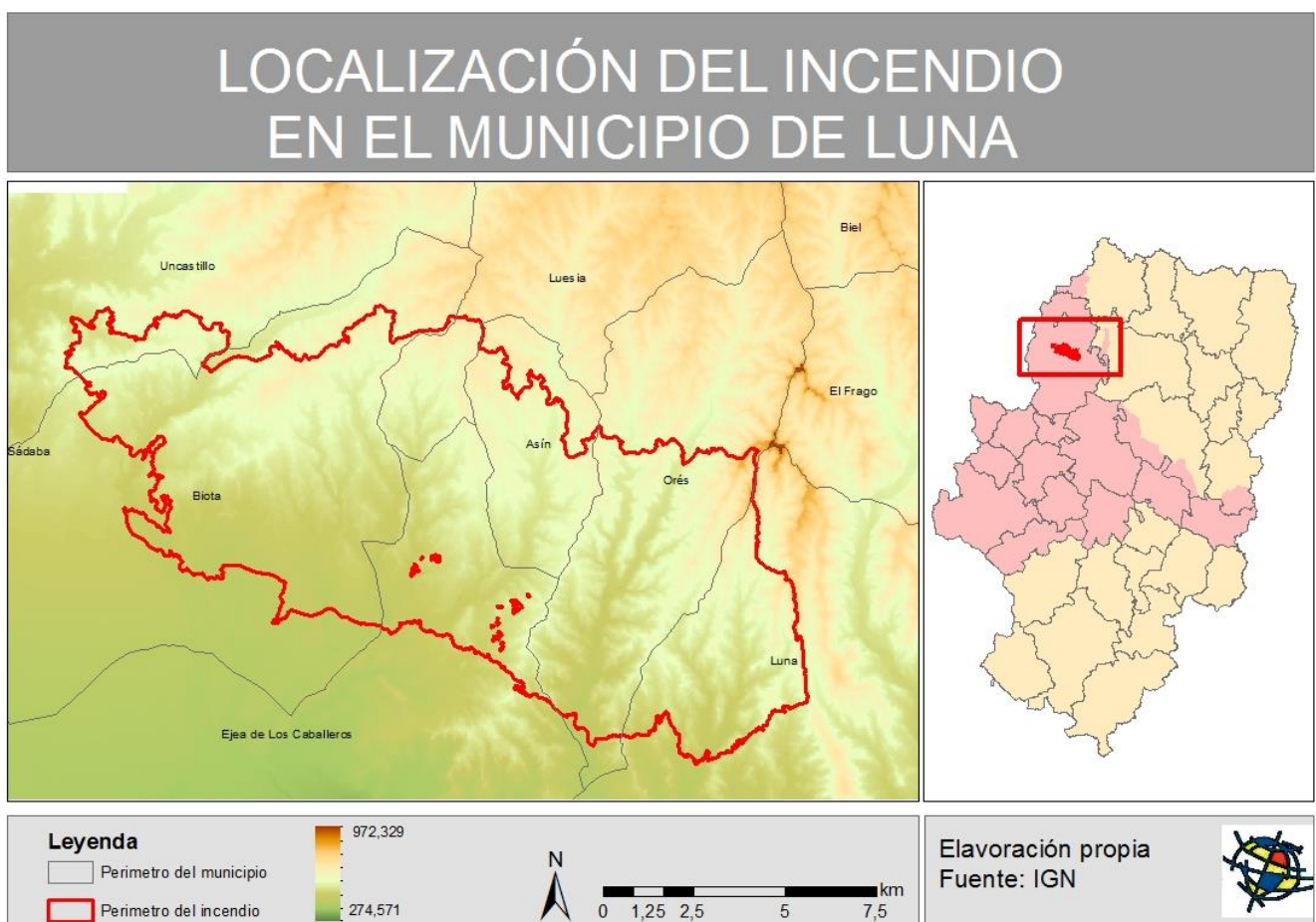


Figura 2: Localización del incendio de Luna, 2015

Las cinco villas es la comarca mas grande de Aragon, con una estensionde 3.000 km². Por el sur linda con Navarra y las comarcas de la Ribera Alta del Ebro y de Campo de Borja. Por el norte con la comarca de la Jacetania y el rio Aragon. Por el este con el rio Gallego y la hoya de Huesca y por el oeste con Navarra (*idearagon*).

La comarca se encuentra en una zona de transición entre el somontano pirenaico y la Depresión del Ebro. Concretamente la zona que se vio afectada es la de la sierra de Luna y parte de la sierra de Marcuera. El relieve de la zona afectada por el incendio se caracteriza por la acción erosiva diferencial y las deposiciones de sedimentos en las partes bajas de los vales, esto lleva a que el relieve este compuesto por una sucesión de sierras, barrancos y vals de fondo plano. Esto conlleva, a que sea un relieve irregular con zonas diferenciadas entre las partes más altas con vegetación natural y las zonas de los valles planos destinadas a la agricultura.

### 3.1.1 Características climáticas de la zona

La localización de la comarca y la diferencia de altitud en esta, hacen que la comarca de las Cinco Villas presente una gran variedad climática. Esta comarca supone una zona de transición entre el **clima del somontano**, que se caracteriza por tener un clima mediterráneo continental influenciado por la altitud, lo que conlleva a una mayor cantidad de precipitaciones y a unas temperaturas más suaves en los meses de verano y más frías en los de invierno. Y el **sector central de la Depresión del Ebro**, el clima se caracteriza por ser mediterráneo, aunque con ciertos rasgos de continental, debido a los grandes contrastes térmicos entre unas estaciones y otras, su localización entre dos grandes cadenas montañosas hace que las precipitaciones sean escasas, esto unido a viento dominante característico de la zona “el cierzo”, hace que sea una área con tendencia a la aridez. (*Skyptychuk, 2016*).

Para comprender mejor las características de la zona del incendio, hay que hacer un análisis más exhaustivo de la climatología en el municipio afectado. La ubicación a la que pertenece el municipio de Luna, según la clasificación Cfb de Köpper y Geiger, se clasifica dentro de los climas cálido y templado, con una cantidad significativa de precipitaciones, de 535mm anuales, y una temperatura media anual de 12,3°C. Como ya se ha comentado, el municipio se encuentra en la zona climática mediterránea continental, pero debido a la gran cantidad de precipitaciones anuales, sobre todo en los meses de invierno, se puede deducir que tiene una gran influencia oceánica atlántica.

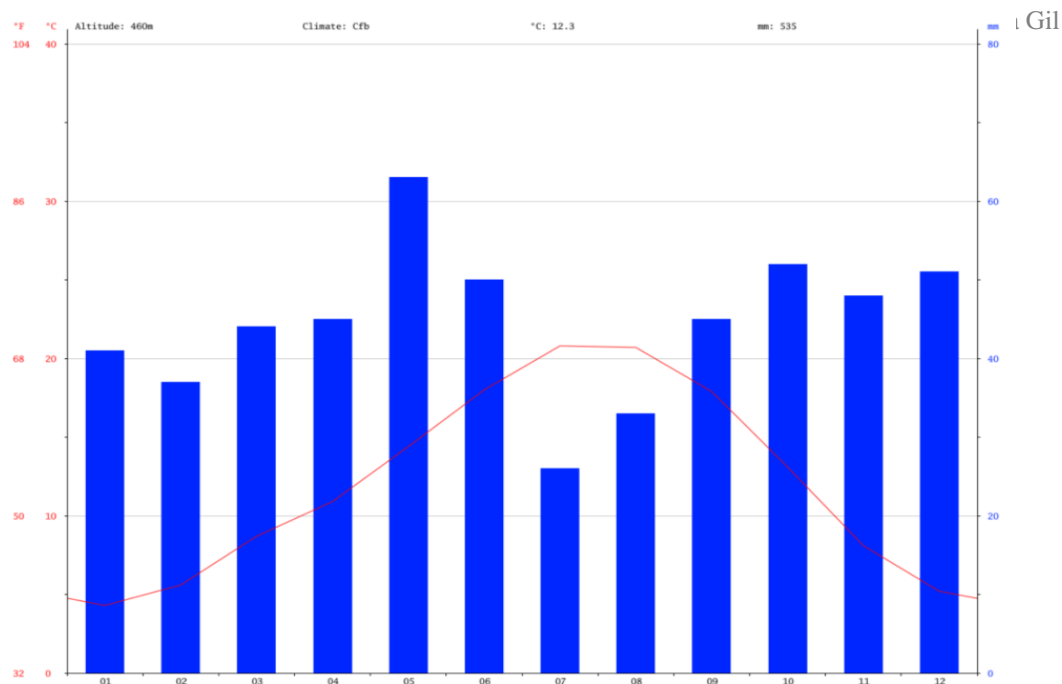


Figura 3: Climograma del municipio de Luna. Fuente: (climate-data.org)

Como se observa en la figura 3, las precipitaciones anuales son elevadas, con solo dos meses secos al año, julio y agosto, el mes con menos precipitación es junio, con 14mm, y el mes donde más precipitaciones de media se registran es el de mayo superando los 30mm.

La línea de las temperaturas muestra claramente un clima templado del hemisferio norte, con las máximas medias en los meses de verano, más concretamente en el mes de julio con 21°C de media, y las temperaturas medias más bajas se dan en el mes de enero con 4°C de media.

### 3.1.2 Características de la vegetación de la zona

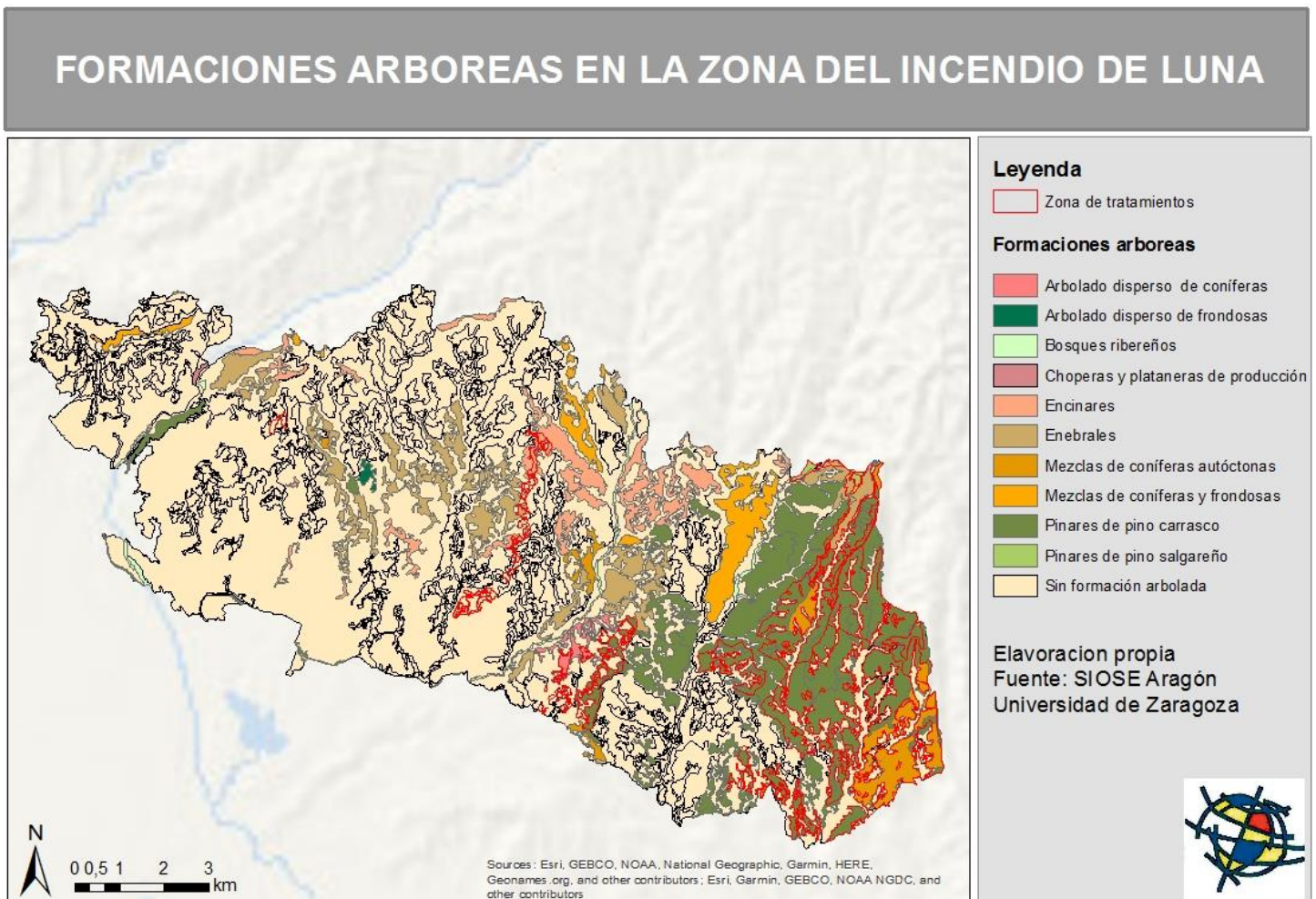
La gran variedad climática de la comarca hace que se puedan distinguir diferentes zonas de vegetación.

En la parte norte, más alta y húmeda, se pueden encontrar formaciones boscosas de pino salgareño (*Pinus nigra*) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*), acompañados de diferentes especies arbustivas como el enebro (*Juniperus communis*) o la griñolera (*Cotoneaster horizontalis*). La mayoría de estos bosques no han surgido de forma natural, sino a raíz de replantaciones. En zonas con menor altitud encontramos bosques de quejigos (*Quercus faginea*) y zonas aisladas con presencia de robles (*Quercus*).

En las zonas de transición entre las zonas altas y húmedas del somontano y la Depresión del Ebro, se aprecian bosques de encinas (*Quercus ilex*) junto a sabinas (*Juniperus sabina*) o enebrales (*Juniperus communis*), aunque de manera muy dispersa.

En la parte de la Depresión del Ebro, y en la zona de estudio, la especie más característica es el pino carrasco (*Pinus halepensis*), también se puede apreciar en estas zonas formaciones de matorrales como la coscoja (*Quercus coccifera*), la sabina (*Juniperus sabina*) o el enebro (*Juniperus communis*).

En las zonas de ribera, más cercanas al cauce del río, se encuentra vegetación higrófila, es decir que necesitan grandes cantidades de agua para sobrevivir, como el chopo (*Populus alba*), el álamo (*Populus tremula*) y los tamízales. En las zonas más áridas destaca la vegetación xerófila, vegetación con gran resistencia al estrés hídrico, como el tomillo (*Thymus*), el romero (*Rosmarinus officinalis*) o las aliagas (*Genista scorpius*). (Skypnychuk, 2016), (MITECO ,2007)



*Figura 4: Formaciones arbóreas en la zona del incendio.*

En la zona de estudio destacan las áreas de cultivos, sobre todo en las partes más bajas y llanas, el resto de la zona pertenece a formaciones forestales naturales, en las que destaca principalmente el pino carrasco (*Pinus halepensis*), también zonas de mezclas de coníferas con frondosas y encinares (*Quercus ilex*). La vegetación natural de la zona es variada, ya que se puede apreciar un pequeño ejemplo de cada una de las formaciones vegetales comentadas anteriormente.



## 3.2 Características del incendio y tratamientos aplicados

### 3.2.1 Características

Según el informe oficial del Gobierno de Aragón (*Gobierno de Aragón, 2015*) la causa que provocó este incendio fue una negligencia humana relacionado con un fallo en una cosechadora. El incendio comenzó en un val de cultivo de cereal y vegetación natural de pino carrasco. La negligencia y las condiciones atmosféricas desfavorables de los días anteriores tuvieron como resultado uno de los mayores incendios de la provincia en las últimas décadas.

**Las condiciones atmosféricas** que precedieron al día del incendio se caracterizaron por ser más altas y secas de lo que corresponde a la zona y a la época del año. En los 3 meses previos se acumularon 60,7mm de precipitación, siendo lo normal 144mm para esa época del año. Además, en los 20 días previos al fuego no llovió un solo día y una ola de calor subsahariana (temperaturas máximas mayores a 33°C durante 10 días y temperaturas mínimas superiores a los 20°C). El día del incendio la temperatura fue de 36,3°. En figura X se aprecia la evolución de las temperaturas y la humedad relativa el día del incendio. (*Gobierno de Aragón, 2015*)

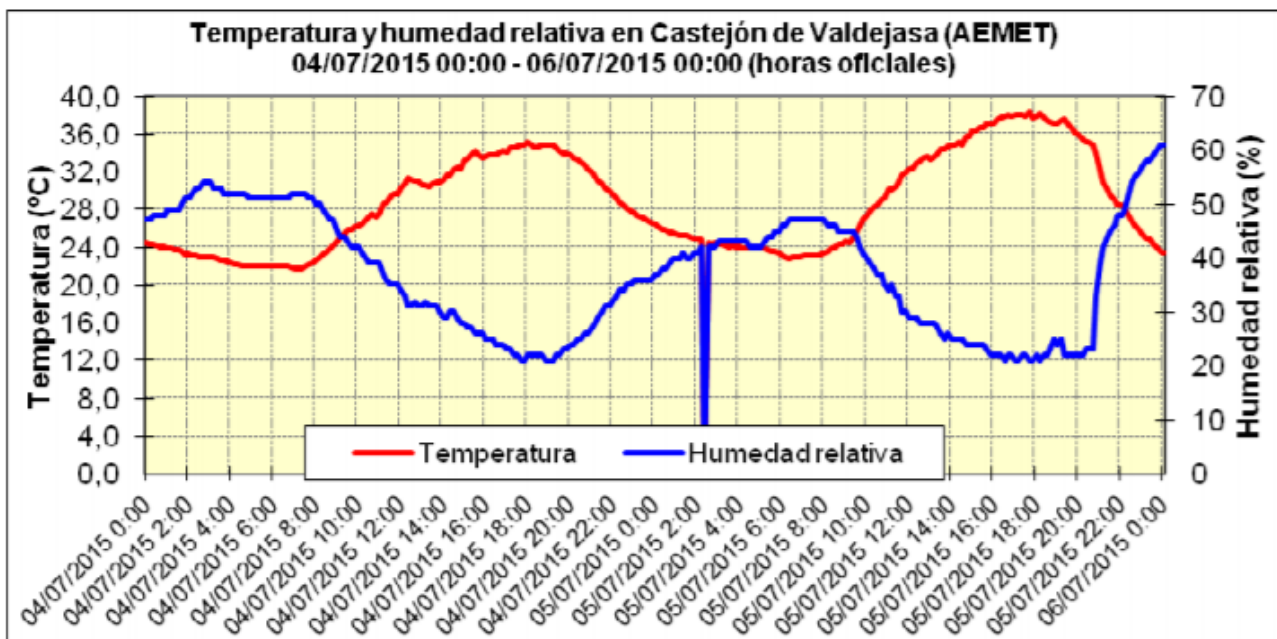


Figura 5: Temperaturas y humedad de los días previos al incendio. Fuente: Gobierno de Aragón, (2015)

En lo que refiere a **vegetación**, en el incendio se quemaron 14.000 ha, de estas 14.000 ha, 8.000 se trataban de cultivo, mayoritariamente de cereal, y el resto se correspondía con diferentes formaciones arbóreas, principalmente pinares de pino carrasco y en algunas partes mezcla de coníferas. Otras de las formaciones arbóreas que se vieron afectadas por el incendio de 2015 fueron encinares, enebrales, bosque de mezclas entre coníferas y frondosas. (Comprobar la figura 4).

### Los tratamientos post-incendio

Cuatro días después del incendio se reúnen los representantes de los ayuntamientos con diferentes técnicos y expertos, en dicha reunión se decidió que hacer en cada una de las zonas afectadas y se estimó un presupuesto de más de un millón de euros repartidos en la recuperación de la cubierta vegetal, la conservación del sistema hidrológico, la reconstrucción de las infraestructuras dañadas y el mantenimiento de los hábitats. Cada uno de los municipios afectados estableció unos tratamientos pos incendios determinados, a continuación se explican y localizan cada uno de ellos: (*Gobierno de Aragón, 2015*):

- **Tajo2\_TOTAL.** Se corresponde con tratamiento selvícola de roza de encinar. **(1)**
- **Aprovechamiento 149.** Se corresponde con la superficie adjudicada a un maderista en el MUP 149 (Rompesacos) propiedad del Ayto. de Luna. **(2)**
- **Aprovechamiento 150\_8.** Se corresponde con la superficie adjudicada a un maderista en el MUP 150 (San Quintín y Valdeanías (lote 8)) propiedad del Ayto. de Luna. **(3)**
- **Aprovechamiento 150\_9.** Se corresponde con la superficie adjudicada a un maderista en el MUP 150 (San Quintín y Valdeanías (lote 9)) propiedad del Ayto. de Luna. **(4)**
- **Aprovechamiento 164.** Se corresponde con la superficie adjudicada a un maderista en el MUP 164 (Valdearatas) propiedad del Ayto. de Orés. **(5)**
- **Aprovechamiento 286.** Se corresponde con la superficie adjudicada a un maderista en el MUP 286 Corraliza de la Raya propiedad del Ayto. de Ejea de los Caballeros **(6)**
- **Aprovechamiento 304.** Se corresponde con la superficie adjudicada a un maderista en el MUP 304 (Casa del Chesó) propiedad del Ayto. de Orés. **(7)**
- **Trata selv 04.** Se corresponde con el apeo y desramado de pinar y dejado in situ **(8)**
- **Fajinas.** Se corresponde con la roza\* de la vegetación y la construcción de fajinas en curva de nivel para retención de sedimentos **(9)**
- **Ahoyado.** Se corresponde con un ahoyado para reforestación, la cual se plantará este invierno (actual 2018- 2019) **(10)**
- **Apeo.** Se colocado para mantener y estabilizar el terreno dificultando la erosión de este. **(11)**

## TIPOS DE TRATAMIENTOS INCENDIO DE LUNA (2015)

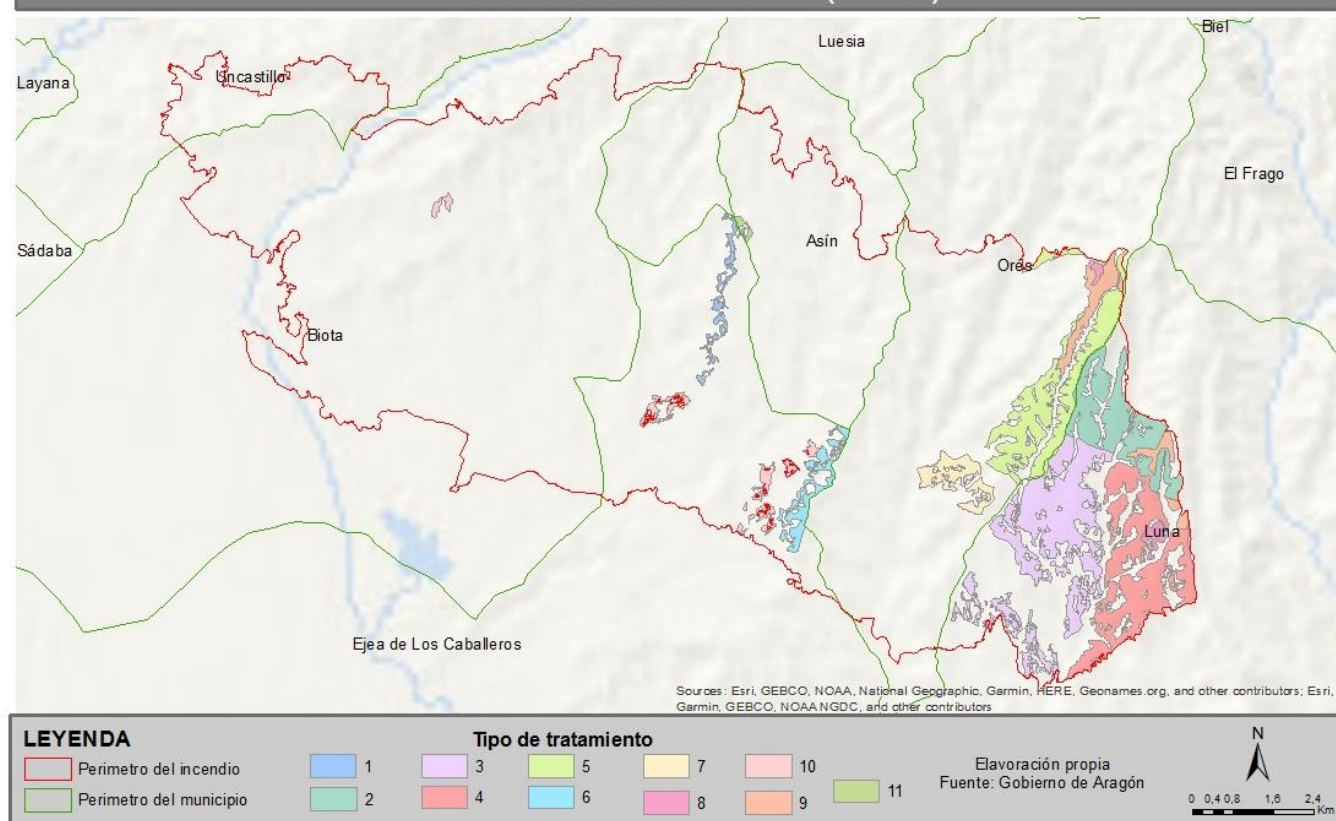


Figura 6: Tipos de tratamientos post-incendio

A continuación se expone una tabla con los nombres de los diferentes tratamientos realizado en el incendio de Luna, el acrónimo establecido y el número con el que aparecen en la leyenda, tanto del mapa como de los diferentes gráficos del apartado 5 y el la base de datos.

NOMBRE DEL TRATAMIENTO	ACRÓNIMO	LEYENDA
<b>Tajo2_TOTAL</b>	Tajo	1
<b>Aprovechamiento 149</b>	A-149	2
<b>Aprovechamiento 150_8</b>	A-150_8	3
<b>Aprovechamiento 150_9</b>	A-150_9	4
<b>Aprovechamiento 164</b>	A-164	5
<b>Aprovechamiento 286</b>	A-286	6
<b>Aprovechamiento 304</b>	A-304	7
<b>Trata selv 04</b>	Trata_selv	8
<b>Fajina</b>	Fajina	9
<b>Ahoyado</b>	Ahoyado	10
<b>Apeo</b>	Apeo	11

Figura 7: Nombres y acrónimos de los tratamientos post-incendio



### 3.2.2 Severidad del incendio

El incendio que se produjo en el municipio de Luna en el año 2015 se encuentra dentro del rango de severidad moderada, pero se pueden apreciar diferencias entre las zonas afectadas.

Las zonas con mayor pendiente y en las que predominaba el pino carrasco (*Pinus halepensis*) son en las que se identificaron los niveles de severidad más elevados. En la figura 8 se pueden diferenciar tres imágenes, la severidad, los valores de NDVI previos y la vegetación de la zona antes del incendio. También aparecen tres zonas dentro de cada imagen, que corresponden a tres zonas diferenciadas dentro de la zona afectada.

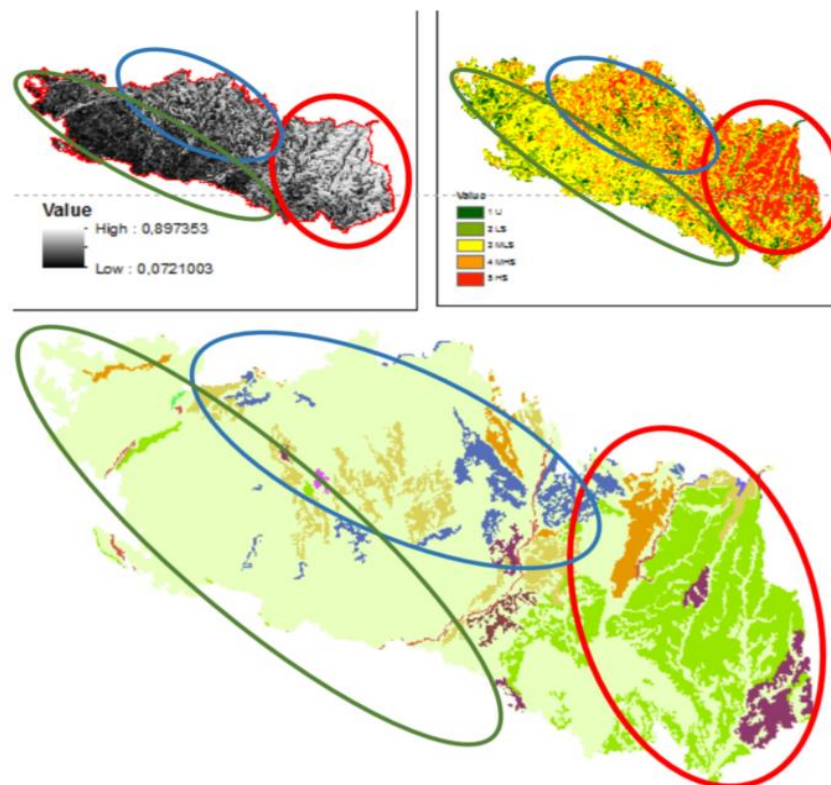


Figura 8: Representación severidad, NDVI previo y comunidades vegetales.  
(Skypnychuk, 2016)

- I. Círculo rojo: la zona con la severidad más alta, por tanto la más afectada. Con altos valores de NDVI previos y dominada por pino carrasco (*Pinus halepensis*).
- II. Círculo azul: de severidad media, los valores de NDVI previos no tienen una continuidad espacial, ya que dependiendo de la zona registran unos valores altos y en otros bajos, la vegetación es variada.
- III. Círculo verde: severidad baja, valores previos de NDVI bajos y baja densidad foresta.

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Materiales

A continuación se enumeran los diferentes materiales utilizados en este trabajo y las fuentes de datos empleadas.

**Las imágenes de satélite.** Un total de 5 imágenes de satélite han sido obtenidas de la Agencia Espacial Europea (*European Space Agency - ESA*). Esta agencia dispone de diferentes plataformas y satélites que permiten la descarga de datos e imágenes. Para este proyecto se han recopilado imágenes de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, que pertenecen al Programa *Copernicus*, cuyo cometido se centra en la realización de observaciones de la Tierra, en la monitorización de procesos y en la gestión de desastres naturales. El satélite Sentinel lleva el sensor multispectral MSI (*MultiSpectral Instrument*) que captura imágenes en 13 bandas espectrales en el rango que va desde los 443 nm a los 2190 nm (VNIR y SWIR). Utiliza un sistema de barrido *Push-broom* y proporciona imágenes de 290 km de ancho.

En la tabla 3 se recogen las características principales de este sensor.

Nº DE BANDA	LONGITUD DE ONDA (nm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)
2	490	10
3	560	10
4	650	10
8	842	10
5	705	20
6	740	20
7	783	20
8	865	20
11	1610	20

12	2190	20
1	443	60
9	940	60
10	1375	60

*Figura 10: Características principales del sensor Sentinel-2*

Las imágenes recopiladas para este trabajo corresponden con el año 2018. La idea principal era disponer de una imagen para cada mes del año, de esta manera poder realizar una interpretación más rigurosa de la evolución interanual, no obstante, debido a diversos factores relacionados con la presencia de nubes, la colección se ha reducido a 5 imágenes correspondientes a los meses de abril, junio, julio, agosto y diciembre. (Tabal 11)

En la tabla 3 se recogen las características principales de este sensor.

SATELITE	FECHA
<b>Sentinel2A</b>	1 de abril del 2018
<b>Sentinel2A</b>	23 de junio del 2018
<b>Sentinel2A</b>	30 de julio de 2018
<b>Sentinel2A</b>	19 de agosto de 2018
<b>Sentinel2A</b>	7 de diciembre de 2018

*Figura 11: Tabla de la fecha de las imágenes y el satélite de que se obtienen*

Para su descarga se ha utilizado la plataforma de acceso abierto *Sentinel Hub*, a través del punto de acceso para usuarios de API (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

**Información sobre variables ambientales.** MDE y SIOSE. Para disponer de la información espacial de las formaciones arbóreas antes del incendio es necesaria la descarga del SIOSE (Sistema de Información sobre ocupaciones del suelo en España), esta información se encuentra a una escala 1:25000 y el año de referencia es 2005. Por su parte El MDE (modelo digital de elevaciones) nos permite disponer de información como la altura, modelos de iluminación o la pendiente y la orientación topográfica de la zona de estudio a través de una serie de cálculos. Ambas informaciones se ha obtenido del centro de descargas del CNIG (centro nacional de información geográfica).

El Departamento de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón ha proporcionado para este trabajo toda una serie de datos e información en formato vectorial, relacionados con el perímetro, la superficie de incendio y las zonas donde se han desarrollado los diferentes tratamientos post-incendio.

### **Información sobre la zona quemada y las actuaciones postincendio realizadas.**

Por otro lado, se debe disponer de **información espacial** para complementar la base de datos junto a las imágenes de satélite.

El gobierno de Aragón ha proporcionado para este trabajo de forma casi exclusiva, ya que no se encuentra disponible de manera pública, una serie de datos y capas vectoriales del perímetro del incendio y de las zonas donde se han desarrollado los diferentes tratamientos post-incendio.

Para disponer de la información espacial de las formaciones arbóreas antes del incendio es necesaria la descarga del SIOSE (sistema de información sobre ocupaciones del suelo en España), esta información se encuentra a una escala 1:25000 y el año de referencia es 2005.

El MDE (modelo digital de elevaciones) nos permite disponer de información como la altura, la pendiente, la sombra o la orientación de la zona de estudio a través de una serie de cálculos en el software Arcgis. El MDE se obtiene del centro de descargas del CNIG (centro nacional de información geográfica).

## 4.2 Metodología

Esquema de la metodología llevada a cabo para la elaboración del proyecto.

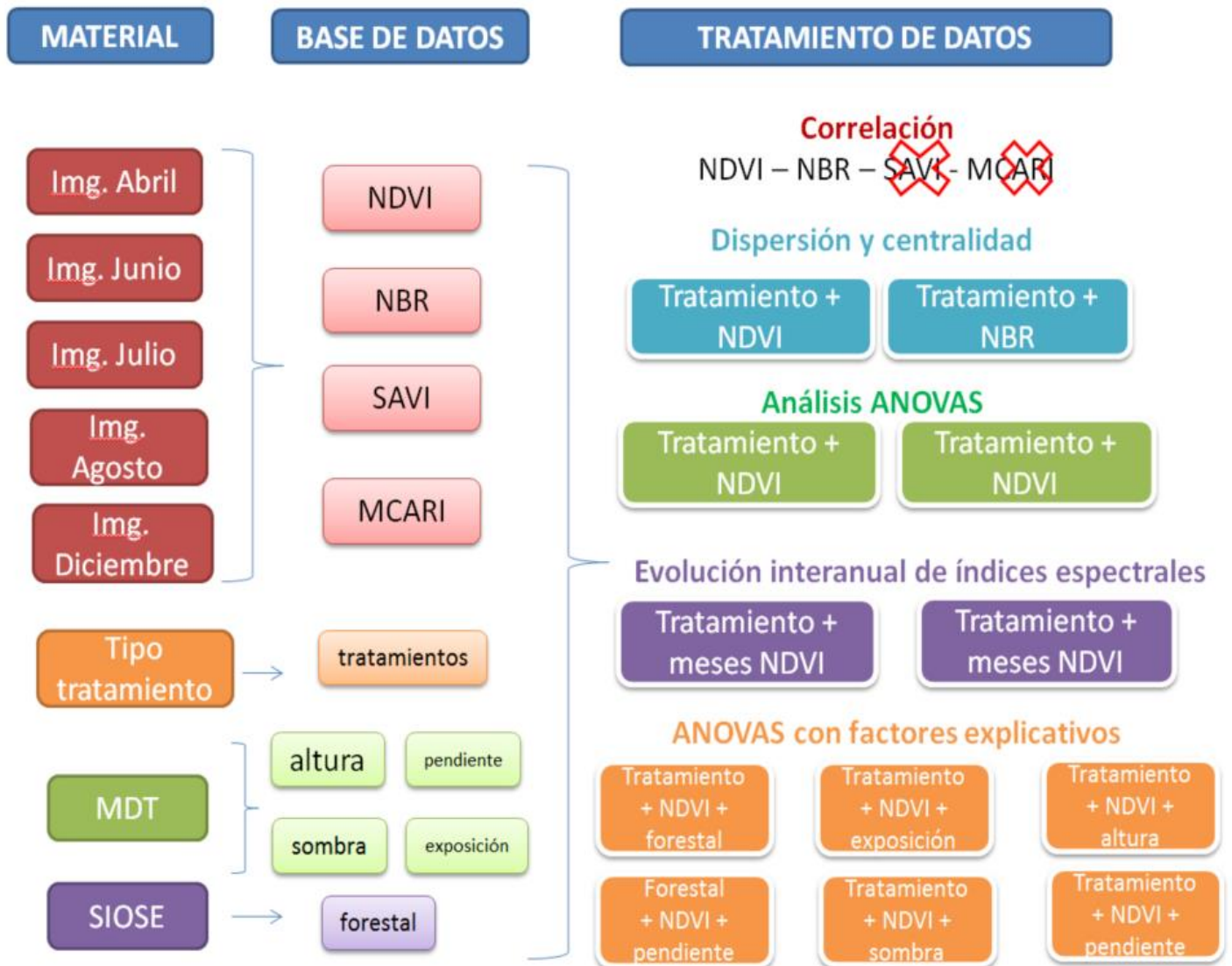


Figura 9: Esquema de metodología

### 4.2.1 Tratamiento de las imágenes

Para el tratamiento de las imágenes de satélite se generan diferentes índices espectrales que permite conocer las características de la vegetación en la zona de estudio. Esto se consigue, en este caso, a través de los índices NDVI, NBR, SAVI y MCARI (*M. Peña, 2017*)

○ **NDVI:** El índice de diferencia normalizada es un neocanal orientado al análisis de la vegetación mediante la combinación de las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. El análisis de la reflectancia de estas longitudes de onda se basa en la gran absorción del rojo debido a la presencia de clorofila, y a la reflectancia que presenta el NIR (infrarrojo cercano) debido a la diferencia de la radiación en el mesófilo. De este modo las imágenes son muy luminosas en las zonas con alta cantidad de vegetación y más oscuras en los suelos desnudos o con masas de agua.

La fórmula es la siguiente:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{ROJO}}{\text{NIR} + \text{ROJO}}$$

Los resultados que obtenemos con la utilización de este índice nos permiten conocer las diferentes coberturas de vegetación, sus características y el estado en el que se encuentran. Los datos obtenidos oscilan entre 1 y -1. Los datos más bajos corresponden a las zonas con agua, con nieve o de suelo desnudo, los datos que rondan el 0 son zonas sin vegetación, como el barbecho. Por último los datos que superan el 0,2 son las zonas con vegetación, dentro los valores en los que se engloba la vegetación también encontramos diferencias, los valores más bajos, pero superiores al 0,2, son los correspondientes a una vegetación con menos vigor vegetal, mientras que los valores próximos a 1 se relacionan con vegetación con mucho vigor. (*Geoinnova, 2016*)

○ **NBR:** Es un índice muy usado en casos de incendios, ya que permite comprobar la severidad con la que el fuego ha devastado la vegetación. Gracias a este índice se pueden evaluar los daños forestales del incendio y cómo ha evolucionado la cubierta vegetal tras este. El NBR combina las bandas den NIR (infrarrojo cercano) y del SWIR (infrarrojo medio). La firma espectral de la vegetación tras un incendio muestra bajos niveles de reflectancia en el NIR y altos en el SWIR, mientras que la vegetación sana tiene un comportamiento opuesto. *Key y Benson, (2002)*

La fórmula es la siguiente:

$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

Tras la realización del índice se obtiene una imagen que nos permite observar las zonas más dañadas tras el incendio, a partir de esta procedemos interpretar los datos. Los resultado oscilan entre -1 y 1, los más cercanos al -1 son las zonas quemadas con mayor gravedad, contra más alto sea el valor menos gravead ha sufrido la vegetación tras el incendio o mayor capacidad de regeneración ha experimentado.

○ **SAVI:** Este índice es similar al NDVI, pero la función del SAVI es minimizar las influencias del suelo en los análisis espectrales, ya que factores y características del suelo como la humedad, el color o la saturación pueden influir en los datos espectrales. Aplicando este índice, la influencia del brillo del suelo no distorsiona los valores espectrales de la vegetación. Al igual que en el caso del NDVI, como es lógico, las bandas utilizadas son las del rojo y la del infrarrojo NIR. (V.Vani-2017)

La fórmula es la siguiente:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - ROJO)}{(NIR + ROJO + L)}$$

La “L” es el factor de ajuste, en este caso su valor es de 0,5, de esta manera se elimina la necesidad de calibración para los diferentes suelos.

○ **MCARI:** Este índice se basa en el verdor de la vegetación, es decir la cantidad de clorofila que contiene la hoja. Se utiliza para conocer la actividad de la fotosíntesis, el estrés hídrico y el estado nutricional en el que se encuentra la vegetación. Las bandas que se utilizan para la realización de este índice son 2 del espectro visibles, la del verde y la del rojo, y la del infrarrojo cercano NIR. A través de la absorción en la banda del verde y la reflectancia que supone la clorofila y el mesófilo en las bandas del rojo y el NIR, se puede determinar el estado en el que se encuentra la vegetación en una determinada zona o la evolución dependiendo de la época del año.

$$Mcarl = 1,2 (2,5 (NIR-RED) - 1,3 (NIR-GREEN))$$

A cada una de las 5 imágenes de los meses se le aplican los 4 índices, de esta manera se obtienen diferentes capas raster donde a cada pixel le corresponde un valor.

Hay que añadir, aunque pertenezca al apartado de tratamiento de datos, que debido a la importante correlación que muestran los índices NDVI y SAVI y a la mayor complejidad que implica la comprensión de MCARI en la evaluación de le regeneración

vegetal post-incendio, se ha decidido prescindir de ambos manteniendo únicamente a los más relevantes en casos de recuperación de la vegetación post-incendio, NDVI y NBR. La tabla de correlación entre los índices se encuentra en el apartado de resultados.

### 4.2.2 Generación de la base de datos

Para la generación de la base de datos se ha requerido la siguiente secuencia de fases de trabajo:

1. Generación de una capa de puntos en formato SHP a partir de los centroides de los píxeles de las imágenes Sentinel en cada uno de los polígonos correspondientes a los diferentes tratamientos.
2. Transformación de las informaciones en formato raster disponibles (SIOSE, MDE, sombras, pendiente y orientación) a un tamaño de celda 20x20 metros, coincidiendo con el tamaño de píxel de las imágenes de satélite.
3. Extracción de la información raster disponible (los cuatro índices para cada una de las cinco imágenes, SIOSE, MDE, pendiente...) a partir de la capa de puntos generada en la fase 1 y exportada a formato Excel.

A continuación se enumeran los campos de dicha base de datos:

Coordenadas X, coordenada Y, tipo de tratamiento, formaciones arbóreas, altura, pendiente, sombra, exposición, NDVI abril, NDVI junio, NDVI julio, NDVI agosto, NDVI diciembre, media NDVI, NBR abril, NBR junio, NBR julio, NBR agosto, NBR diciembre, media NBR, SAVI abril, SAVI junio, SAVI julio, SAVI agosto, SAVI diciembre, media SAVI, MCARI abril, MCARI junio, MCARI julio, MCARI agosto, MCARI diciembre y media MCARI.

Para asegurar el carácter independiente de las muestras, minimizar los problemas de autocorrelación espacial y trabajar con documentos de menor tamaño, se realizó un muestro aleatorio de 5000 puntos que representa un porcentaje del 12,5 %.



### 4.2.3. Análisis estadísticos aplicados

A partir de la base de datos se realiza una serie de análisis estadísticos mediante una extensión del programa Excel llamada **XLstat**, que permite el análisis de los datos como correlaciones y ANOVAS entre otros. Posteriormente, los resultados obtenidos se someten a valoración y discusión. A continuación se indican los análisis aplicados:

1. *Análisis de dispersión y centralidad mediante gráficos de cajas y bigotes.* A través de los gráficos de cajas y bigotes se realiza una primera aproximación sobre la distribución de los indicadores de centralidad (media y media) y dispersión (máximos, mínimos, valores atípicos, amplitud de los cuartiles 1° y 3°) de cada uno de los tratamientos para los dos índices propuestos.
2. *Análisis ANOVAS.* Mediante la aplicación de análisis de varianza (ANOVAS) y pruebas *post-hoc* (test de *Bonferroni*) se comprueba la existencia de diferencias significativas entre tratamientos considerando la información derivadas de los índices espectrales como variables dependiente. Además, para identificar posibles interacciones entre predictores nominales, las diferentes variables relacionadas con la morfología topográfica y la altitud se categorizan según los intervalos indicados bajo estas líneas.
  - Exposición: 1 (0° – 100°), 2 (100° – 200°), 3 (200° – 300°) y 4 (> 300°)
  - Pendiente: 1 (0° – 10°), 2 (10° – 20°), 3 (20° – 30°) y 4 (> 30°)
  - Altura: 1 (400m – 500m), 2 (500m – 600m), 3(600m – 700m) y 4 (> 700m)
  - Modelo de iluminación: 1 (< 100), 2 (100 – 150), 3 (150 – 200) y 4 (> 200)
3. *Gráficos de la evolución interanual de los índices espectrales según los tratamientos.* A través de estos gráficos se comprueba la evolución anual de los dos índices para cada tratamiento. Como ya se ha hecho regencia en el apartado 4.1, en el eje de accisas los meses no son consecutivos, por lo que la evolución espectral es más acusada en el último tramo de los gráficos.

## 5. Resultados

En los siguientes apartados se recogen los resultados sobre las comparativas de las medias (análisis ANOVA) de los índices espectrales considerados en función de los tratamientos post-incendio.

En primer lugar, se analiza el promedio de los cinco meses de los que se dispone (abril, junio, julio, agosto y diciembre). En segundo lugar, se presenta el mismo análisis, pero con la evolución que han experimentado los índices a lo largo de estos cinco meses con el propósito de considerar el impacto de la evolución fenológica de la vegetación y la sensibilidad de los índices espectrales a la misma.

Como ya se ha comentado en el apartado 4.2.2, aunque el análisis se ha repetido al utilizarse dos muestreos diferentes. En los siguientes apartados del desarrollo analítico sólo se mostrarán los correspondientes al muestreo número 1, debido a que los resultados entre ambas muestras son similares.

En un primer momento, se decidió utilizar los cuatro índices comentados anteriormente (NDVI, NBR, SAVI y MCARI), pero debido a la importante correlación que existía entre el NDVI y el SAVI y a la complejidad del MCARI se decidió prescindir de ambos manteniendo únicamente a NDVI y NBR.

Variables	NDVI	NBR	MCARI	SAVI
NDVI	1	0,698	0,760	1,000
NBR	0,698	1	0,711	0,698
MCARI	0,760	0,711	1	0,760
SAVI	1,000	0,698	0,760	1

*Figura 12: Correlación entre índices*

## 5.1 Distribución de los valores promedio de los índices espectrales

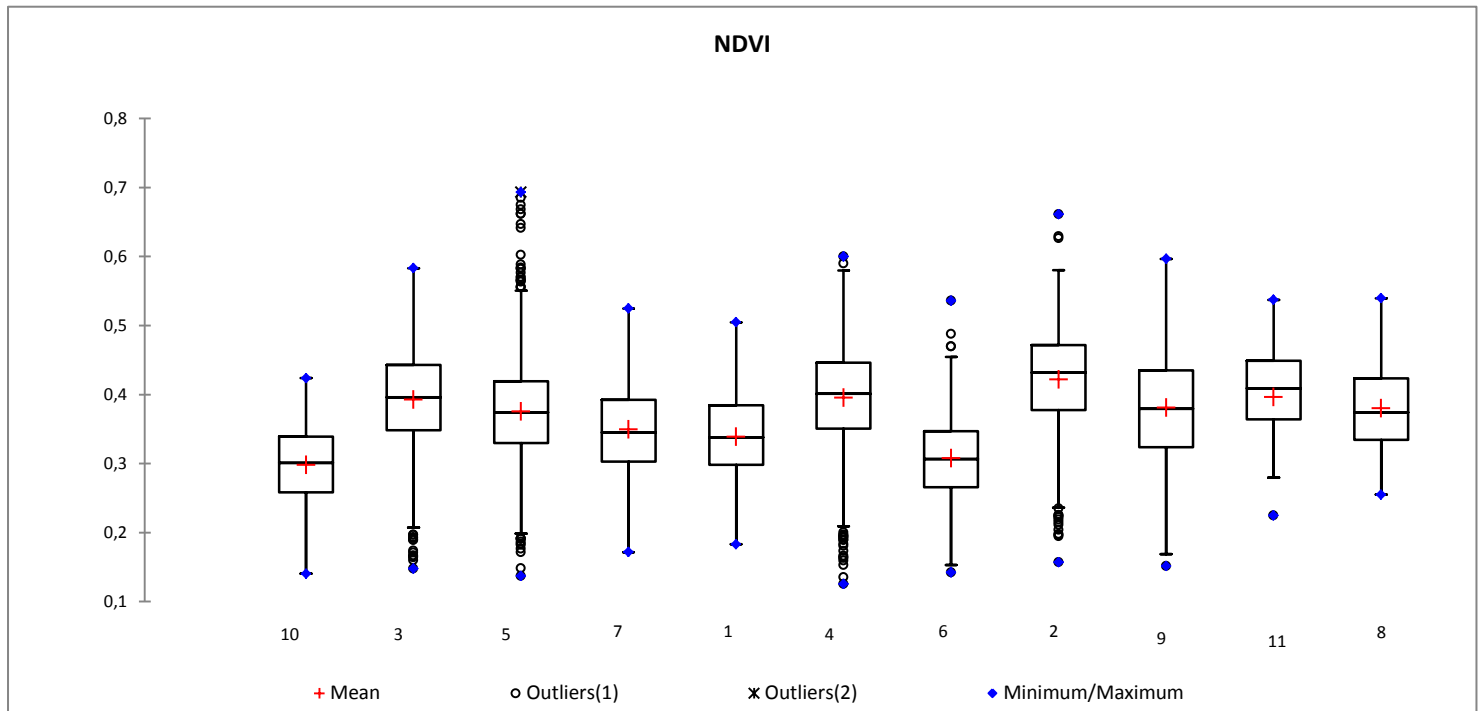
Los valores promedio de cada uno de los tratamientos según los índices NDVI y NBR nos proporcionan información sobre cuál de los tratamientos post-incendio ha tenido la mejor recuperación a nivel vegetal. Con las tablas y gráficos siguientes se comprueban los valores promedio y la desviación estándar de cada Índice Espectral por tratamiento.

La tabla recoge la distribución de los valores por tratamiento e índice. Al comparar las medias de NDVI y NBR, se puede observar que el tratamiento con mejores resultados es el A-149, ya que coincide con los promedios más altos. En la parte inferior de la tabla y, por lo tanto, con las medias más bajas se encuentran los tratamientos A-286 y Ahoyado. En estos últimos se recoge los valores más bajos en ambos índices con diferencias notables en comparación con el resto de los tratamientos.

TRATAMIENTOS	NDVI	NBR
A-149 (2)	0.422	0.222
Apeo (11)	0.396	0.197
Fajinas (9)	0.381	0.213
A-150_9 (4)	0.395	0.175
A-150_8 (3)	0.393	0.153
A-164 (5)	0.376	0.183
Trata-selv (8)	0.380	0.176
A-304 (7)	0.349	0.131
Tajo (1)	0.339	0.129
A-286 (6)	0.308	0.097
Ahoyado (10)	0.298	0.089

*Figura 13: Tabla de tratamientos con medias NDVI y NBR*

Con el objetivo de analizar las medias, el máximo, el mínimo y los valores atípicos de cada uno de los tratamientos, se utiliza el recurso gráfico de cajas y bigotes que permite describir los parámetros de centralidad y dispersión y compara unos tratamientos con otros. Por un lado, el índice NDVI y, por otro lado, el NBR.

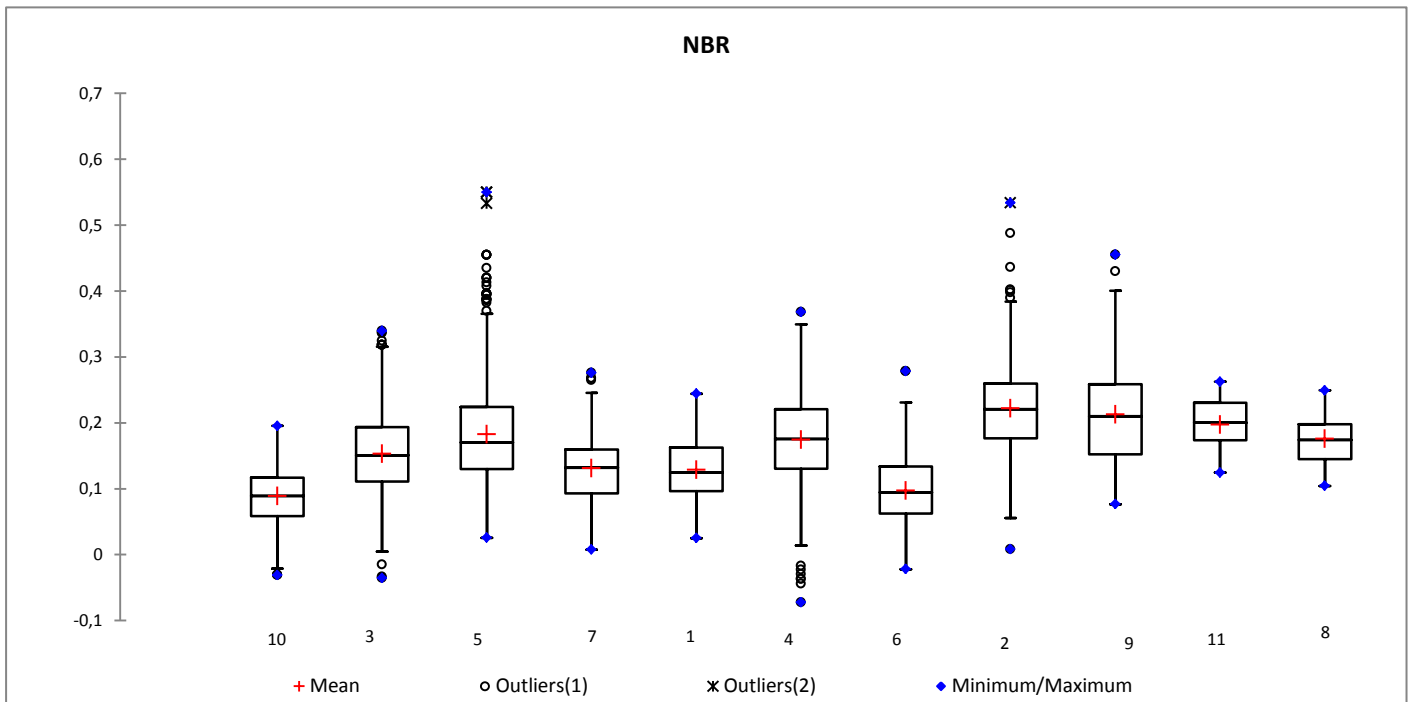


*Figura 14: Distribución de los valores NDVI por tratamientos*

*1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286,*

*7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado, 11 = Apeo*

Los diferentes tratamientos post-incendio presentan unas medias bajas y bastantes similares, destacando los tratamientos de ahoyado y A-286, por tener las medias más bajas, tal y como se ha comprobado anteriormente. En el caso opuesto se encuentra el tratamiento A-149, que destaca con la media más elevada en comparación con el resto. Destaca también la gran variabilidad en algunos de ellos, con unos valores atípicos que sobresalen notablemente del rango intercuartil. Esto se puede observar sobre todos en los tratamientos A-150\_8, A-150\_9, A-149 y A-164. Estos tratamientos se caracterizan por pertenecer a los aprovechamientos realizados por los distintos municipios.



*Figura 15: Distribución de los valores NBR por tratamientos*

*1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A- 164 6 = A-286,  
7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 =Fajina, 10 = Ahoyado 11= Apeo*

En la figura 15, correspondiente al índice NBR, se observa mayor diferencia entre los tratamientos post-incendio. Por el contrario, el tamaño de las cajas, es decir la distancia entre los cuartiles 1º y 3º (50% de las observaciones), es menos acusada en todos los tratamientos. Como sucede en la figura 14, la media más alta se encuentra en el tratamiento A-149 y, la más baja, en los tratamientos de Ahoyado y A-286.

Comparando las figuras 14 y 15 se observan grandes similitudes, las medias máximas y mínimas corresponden a los mismos tratamientos, A-149 y Ahoyado respectivamente. Este hecho también se observa en la figura 13. Los valores atípicos en ambas graficas los encontramos en los mismos tratamientos, perteneciendo estos a aprovechamientos maderistas propiedad de los ayuntamientos afectados.

A través del análisis ANOVAS y las pruebas *post-hoc* (Test de Bonferroni), se comprueba la existencia de diferencias significativas entre pares de tratamientos. La Tabla # recoge un resumen de los mismos.

En las columnas, cada una de las letras en mayúscula identifica una agrupación de tratamientos ya que presentan valores similares y, sobre todo, no presentan diferencias significativas entre ellos; la lectura a través de la filas no permite reconocer el carácter de las variaciones entre grupos diferentes ya que, pueden existir tratamientos que formen partes de agrupaciones diferentes (Letras) pero no tengas diferencias significativas entre sí. Es el caso concreto de los tratamientos Fajinas y Trata\_selv que forman parte de dos grupos diferentes aunque no presentan diferencias significativas entre ellos.

En total se reconocen 5 agrupaciones (Tabla #). En el grupo A, entrarían los tratamientos A-149 y Apeo, destacando el A-149, ya que, presenta diferencias significativas con todos los demás grupos. En la parte baja de la tabla y, por lo tanto, con unos resultados medios más bajos del NDVI, se encuentran los tratamientos A-286 y el Ahoyado dentro del grupo E con diferencias significativas en relación al resto de los tratamientos.

Tratamiento	Media (NDVI)	Gropos	
A-149	0.422	A	
Apeo	0.396	A	B
A-150_9	0.395		B
A-150_8	0.393		B
Fajina	0.381	B	C
Trata_selv	0.380	B	C
A-164	0.376		C
A-304	0.349		D
Tajo	0.339		D
A_286	0.308		E
Ahoyado	0.298		E

*Figura 16: Medias y agrupaciones de los tratamientos según los valores NDVI*

Tras la realización del análisis ANOVAS con los valores NBR y los tratamientos, se pueden observar las medias y agrupaciones que se obtienen aplicando las pruebas *post-hoc* (Test de Bonferroni), al igual que se obtuvo sobre el índice NDVI.

En las columnas, cada letra mayúscula se identifica con una agrupación de tratamientos con valores similares, como se ha comentado anteriormente. Existen tratamientos que no suponen diferencias significativas, pero si pueden pertenecer a grupos diferentes, e este caso, solo sucede con el tratamiento de Apeo, que puede pertenecer tanto al grupo A como al B, entre los demás grupos si encontramos

diferencias significativas, debido a que no hay ningún tratamiento que se encuentre en diferentes grupos, salvo el ya comentado.

Tratamiento	Medias (NBR)	Grupos	
<b>A-149</b>	0.222	A	
<b>Fajinas</b>	0.213	A	
<b>Apeo</b>	0.197	A	B
<b>A-164</b>	0.183		B
<b>Trat-selv</b>	0.176		B
<b>A-150_9</b>	0.175		B
<b>A-150_8</b>	0.153		C
<b>A-304</b>	0.131		D
<b>tajo</b>	0.129		D
<b>A-286</b>	0.097		E
<b>Ahoyado</b>	0.089		E

*Figura 17: Medias y agrupaciones de los tratamientos según los valores NBR*

En la figura X se observa como los 11 tratamientos se agrupan en 5. Por un lado, en el grupo A se encuentran los tratamientos A-149, Fajinas y Apeo, con unas diferencias significativas entre los tratamientos A-149 y Fajinas con respecto al resto, debido a que no pertenecen a ningún otro grupo. Por otro lado, el resto de los tratamientos se encuentran en agrupaciones inferiores, pero destaca el grupo E, que como ocurre con el caso de NDVI, solo se ve representado por los tiramientos A-286 y Ahoyado.

Si se comparan ambos análisis ANOVAS, tanto la del NDVI como la del NBR, se puede observar que en el análisis realizado con los valores de NBR, los grupos a los que pertenecen los tratamientos tienen mayores diferencias significativas entre ellos. La mayoría de los tratamientos, salvo el tratamiento 11, no se encuentran identificados en más de un grupo. Mientras que, el análisis de NDVI los grupos, sobre todo el A, B y C, no son tan diferenciados, debido a que, no se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos. Esto significa que si nos basamos en los valores NBR se pueden observar mayores diferencias entre los tratamientos.

## 5.2 Distribución interanual de los valores de los índices espectrales

En este apartado se compara la evolución de los índices espectrales a lo largo de los cinco meses. Cada tratamiento está identificado con un color diferente, de esta manera se comprueba mejor la evolución a lo largo del periodo intra-anual considerado. Como ya se ha comentado en el apartado correspondiente dentro de la metodología, se debe tener en cuenta que en el eje de abscisas no están reflejados todos los meses, solo aquellos de los que se obtuvieron imágenes de satélite. Por lo tanto, los resultados de evolución son menos precisos y presentan una evolución más acusada, sobre todo, en el último tramo del gráfico.

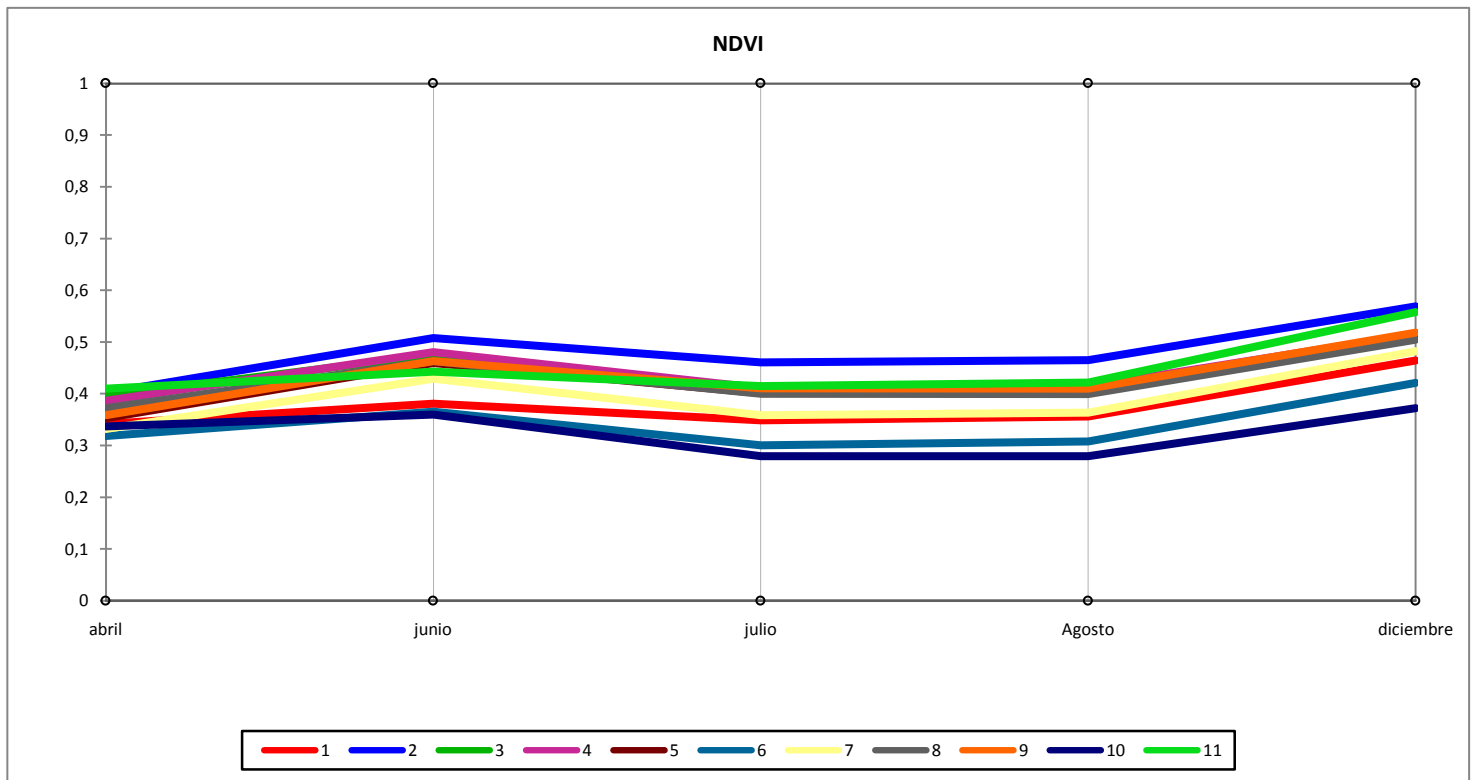


Figura 18: Evolución interanual de los valores NDVI

1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286,  
7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado 11 = Apeo

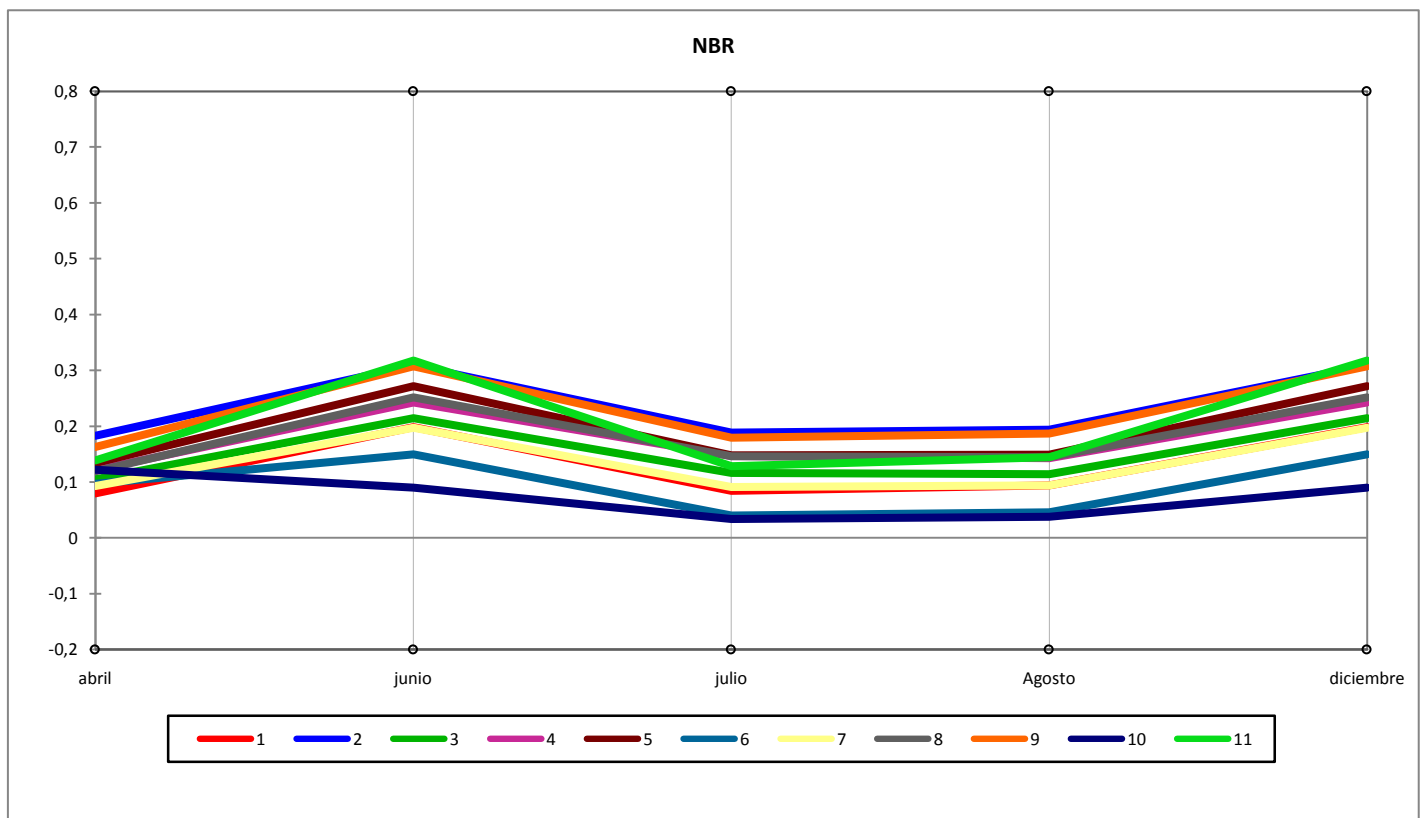
En la evolución intra-anual del NDVI, el máximo se encuentra en el mes de junio, algo esperable porque se trata de un mes de primavera/verano, donde por lo general los valores de NDVI son más altos en comparación con otras estaciones del año. No obstante, los registros pluvio-térmicos en cada año pueden modificar la distribución de los valores.

A lo largo de los meses se observa una gran evolución de los valores espectrales y las diferencias entre los tratamientos se van haciendo cada vez más acusadas. Si atendemos a los datos del primer mes, abril, los valores tienen unas medias muy ajustadas sin apenas cambios entre cada uno. Sin embargo, en el mes de diciembre ya



existe una clara diferenciación entre los valores de NDVI de cada uno de los tratamientos post-incendio.

Como ya se ha comprobado en el resto de gráficos y análisis anteriores, los tratamientos con mayor media son el A-149 y el Apeo, aunque a lo largo de los meses han fluctuado, sobre todo en el caso del tratamiento de Apeo. Esta situación se explica en los gráficos anteriores 16 y 17 donde no apreciamos diferencias del todo significativas de este tratamiento con el resto. En la parte baja de la gráfica están reflejados los tratamientos A-286 y el Ahoyado. Como sucede en el resto de análisis y gráficos anteriores, son los que presentan los valores más bajos de NDVI y con el paso de los meses la diferenciación con el resto de los tratamientos aumenta.



*Figura 19: Evolución interanual de los valores NBR*

*1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286, 7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado, 11 = Apeo*

Esta figura corresponde a la evolución interanual de los valores NBR, como se puede observar, la evolución que presentan los tratamientos a lo largo de los meses es similar a la evolución que experimentan en la figura 18, correspondiente a datos de NDVI. El máximo, en la mayoría de los tratamientos, se encuentra en el mes de junio, como ya se ha comentado en el gráfico anterior es un hecho anómalo tratándose de un mes de verano.

La evolución de los tratamientos con el paso de los meses se hace más acusada, sobre todo en el último tramo, debido a que, como se comentó en el apartado de metodología, no se dispone de información de todos los meses. Se puede observar como los tratamientos A-286 y Ahoyado se desvinculan del resto de los tratamientos, sobre todo a partir del mes de junio, esto se debe a que comparten los valores más bajos en comparación con el resto de los tratamientos como ya se comprobó en apartados anteriores.

Por el contrario, los valores más altos, pese a no ser tan acusada su diferenciación con el resto de los tratamientos, se dan en A-149, Fajinas y Apeo. Mientras que los dos primeros presentan una evolución más regular a lo largo de este periodo de meses, el tratamiento de Apeo presenta un comportamiento más irregular que oscila en el periodo interanual.

La evolución que se produce en los tratamientos es evidente. Entre el primer mes, abril, y el último, diciembre, se pueden encontrar grandes cambios. La diferencia entre los tratamientos es más acusada en el último tramo, debido a que, la vegetación se desarrolla de forma diferente dependiendo del tratamiento en el que se encuentra. Gracias a los índices espectrales podemos observar dichas diferencias y cómo estas se van acentuando con el paso de los meses.

### 5.3 Interacción con variables ambientales

Los valores que se obtienen de los índices en cada tratamiento pueden estar influenciados por factores ambientales como, por ejemplo, la vegetación que había en la zona antes del incendio, la pendiente, la altura, la orientación y la exposición. En este apartado se analiza como interfieren estos condicionantes naturales en los tratamientos post-incendio y cuáles de estas características influyen de manera más decisiva en la recuperar la vegetación.

En relación al papel desempeñado por la vegetación previa, en la Figura 20 se muestran las interacciones entre los tipos de tratamiento y las diferentes formaciones vegetales existentes antes del incendio de 2015. Podemos apreciar que las zonas que antes del fuego presentaban *formaciones de arbolado disperso de coníferas* y en las zonas que se ha aplicado *Ahoyado*, son las que presentan los valores más bajos de NDVI ( $<0,3$ ). En el lado contrario, las zonas de pinar salgareño en las que se ha aplicado *Apeos* para el aprovechamiento de madera (con diferente grado de desarrollo) o *Fajinas*, registran los valores más altos de NDVI ( $>0,45$ ). También se observa que, para las zonas forestales sin estrato arbóreo (línea en color amarillo), independientes del tipo de tratamiento que se haya llevado a cabo, los niveles de regeneración son en general bajos ( $\sim 0,32$ ).

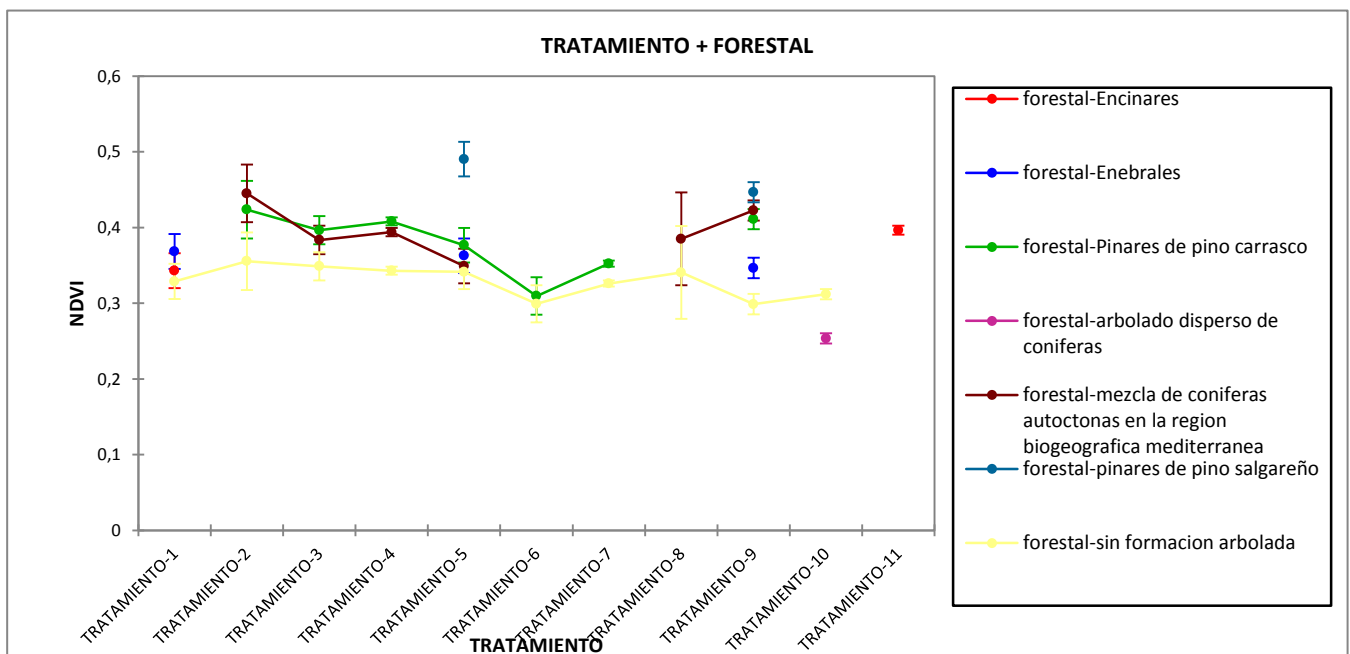


Figura 20: Interacciones entre tratamiento + forestal

1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286,  
7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado, 11 = Apeo

Otro de los aspectos más llamativos que se aprecia, es la importante diferencia en los niveles de regenerado correspondiente a las *formaciones arbóreas de pino carrasco* (monoespecífico o mezclado) en función del tratamiento aplicado. En este

sentido, mientras que los *Apeos* planificados en el MUP 286 en el Ayto. de Ejea de los Caballeros (A-268) muestran valores bajos, en los apeos del MUP 149 en el Ayto. de Luna y en donde se aplicaron *Fajunas* (A-149 y Fajinas) se recogen los valores elevados.

Por tanto, se comprueba que no siempre el tratamiento aplicado dirige la magnitud de la regeneración vegetal, ya que el tipo de vegetación afectada en ocasiones puede potenciar, reducir o inhibir el nivel de regenerado tras el fuego. En este sentido, el *Apeo* no siempre es el mejor tratamiento, ya que también depende del tipo de formación vegetal preexistente; en cambio hay formaciones, o espacios en los que se desarrollan algunas formaciones vegetales, que suelen caracterizarse por unos buenos niveles de regenerado; es el caso concreto de los pinares de salgareño.

La vegetación tiende a adaptarse a las características físicas del terreno, como la pendiente. En la Figura 21 se observa la interrelación de la pendiente y de las diferentes formaciones arbóreas antes del incendio.

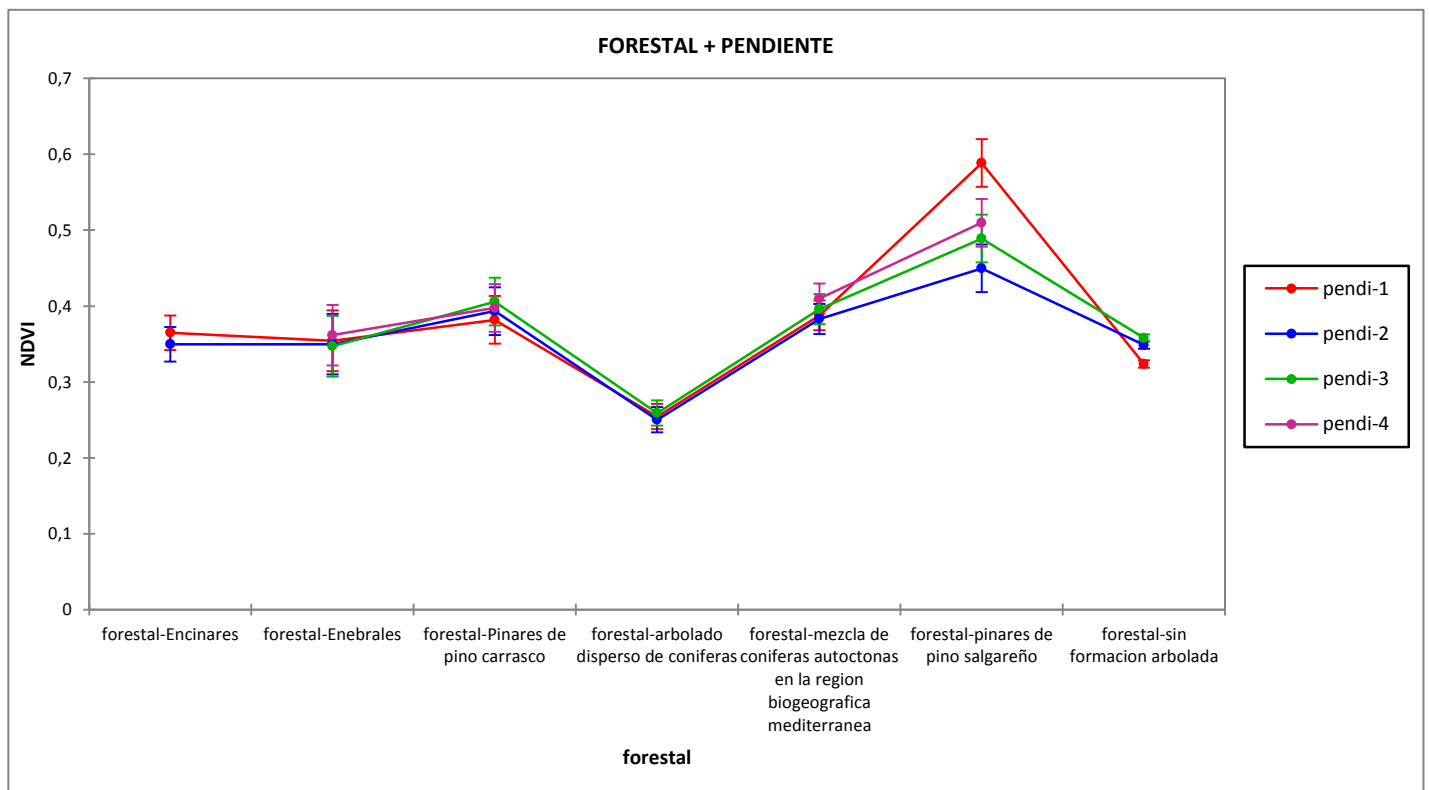


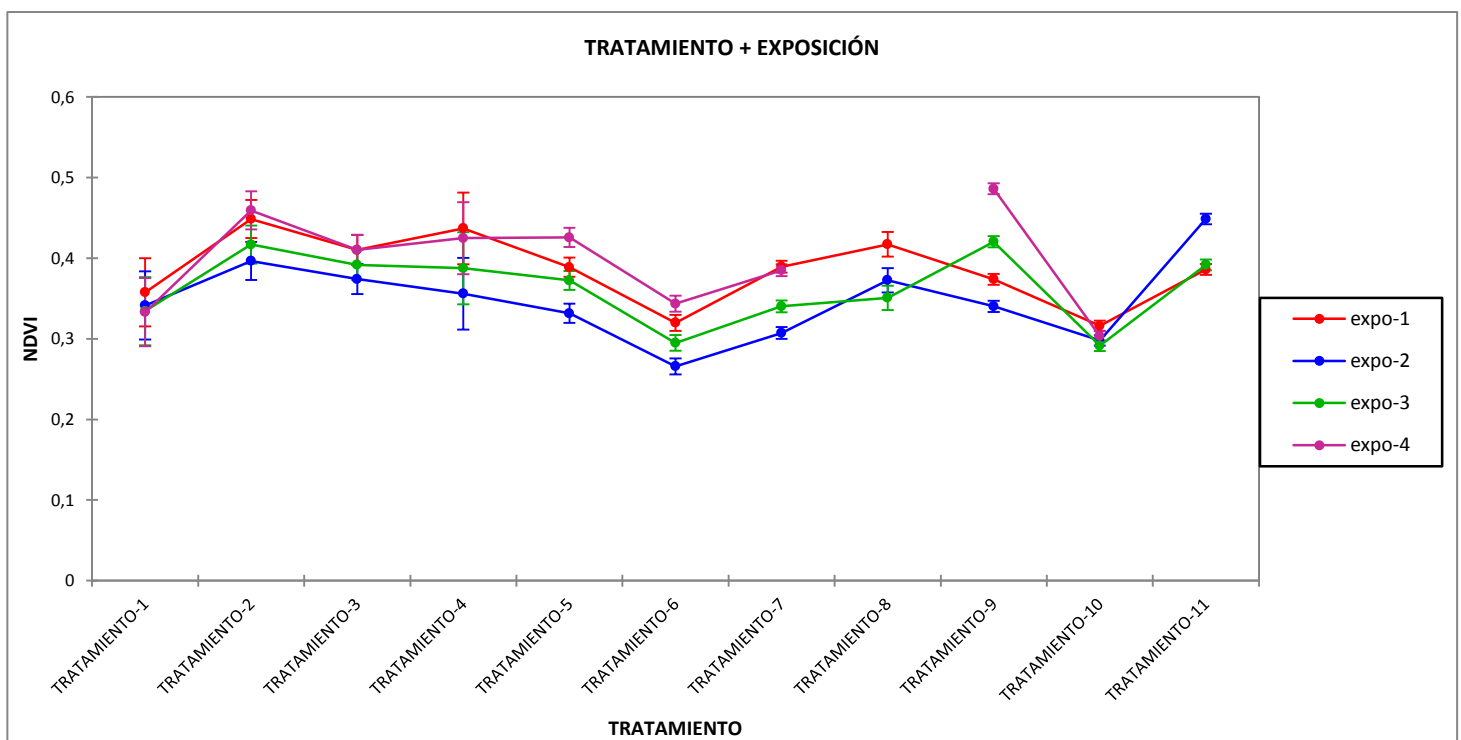
Figura 21: Correlación entre forestal + pendiente y NDVI

*Pendi-1* =  $<10^\circ$ , *pendi-2* =  $10^\circ-20^\circ$ , *pendi-3* =  $20^\circ-30^\circ$  y *pendi-4* =  $>30^\circ$

La pendiente no es un factor determinante para el desarrollo de la vegetación natural según muestra este análisis (Figura 21). Todos los grados de pendiente siguen un mismo patrón, excepto en el caso de las comunidades de pinares de *pino salgareño* en donde el tipo de pendiente controla la distribución de los valores del NDVI. Los mayores valores de NDVI los encontramos, precisamente, en donde aparece esta

formación de pinar en zonas de pendiente inferior a 10°, las zonas con niveles más bajos en NDVI no se dan en las zonas *sin formación arbolada*, como sería lo esperable, sino que, se dan en las áreas donde se encuentra *arbolado disperso de coníferas* (valores NDVI <0,3). Por lo tanto, se deduce, que estas zonas son las que presentan más dificultades a la hora de regenerarse, mientras que, en las áreas donde la cantidad de vegetación era más densa presentan mejor recuperación, independientemente del tratamiento o de la pendiente.

La exposición topográfica es un factor determinante en el desarrollo de la vegetación, los mayores niveles de vegetación se suelen dar en las zonas de exposición norte (NE y NO). En la Figura 22 se observa la distribución de los valores de NDVI que se dan en los diferentes tratamientos dependiendo de la exposición topográfica.



.Figura 22: Correlación entre tratamiento + exposición y NDVI

1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286,  
7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado 11 = Apeo

Expo-1=NE, Expo-2=SE, Expo-3=SO y Expo 4=NO

Como es de esperar, las zonas con mayores niveles de NDVI y, por lo tanto, donde más se ha desarrollado la vegetación son aquellas que se encuentran en la parte de umbría (Expo-1 y Expo-4), estos valores de exposición se los encontramos principalmente en el A-149 y la zona donde se han llevado acabo *Fajinas*. No obstante, todos los tratamientos presentan unos valores promedio similares, excepto el A-286 correspondiente al municipio de Ejea, el Ahoyado y el Tajo, donde encontramos los valores más bajos de NDVI independientemente de la exposición (<0,4). Los valores de exposición tienen un desarrollo casi simétrico en todos los tratamientos, salvo el

tratamiento de *Fajinas*, donde una exposición de solana SO presenta valores más altos que la umbría NE. Un caso similar lo encontramos en el método de *Apeo*, pero con exposición SE (expo-2) que pese a ser una zona prácticamente de solana da los valores más altos en este tratamiento de NDVI.

Los valores de sombra están fuertemente relacionados con los de exposición (comprobar anexo 6), en este se puede comprobar la interrelación que existe entre los tratamientos y los valores de iluminación.

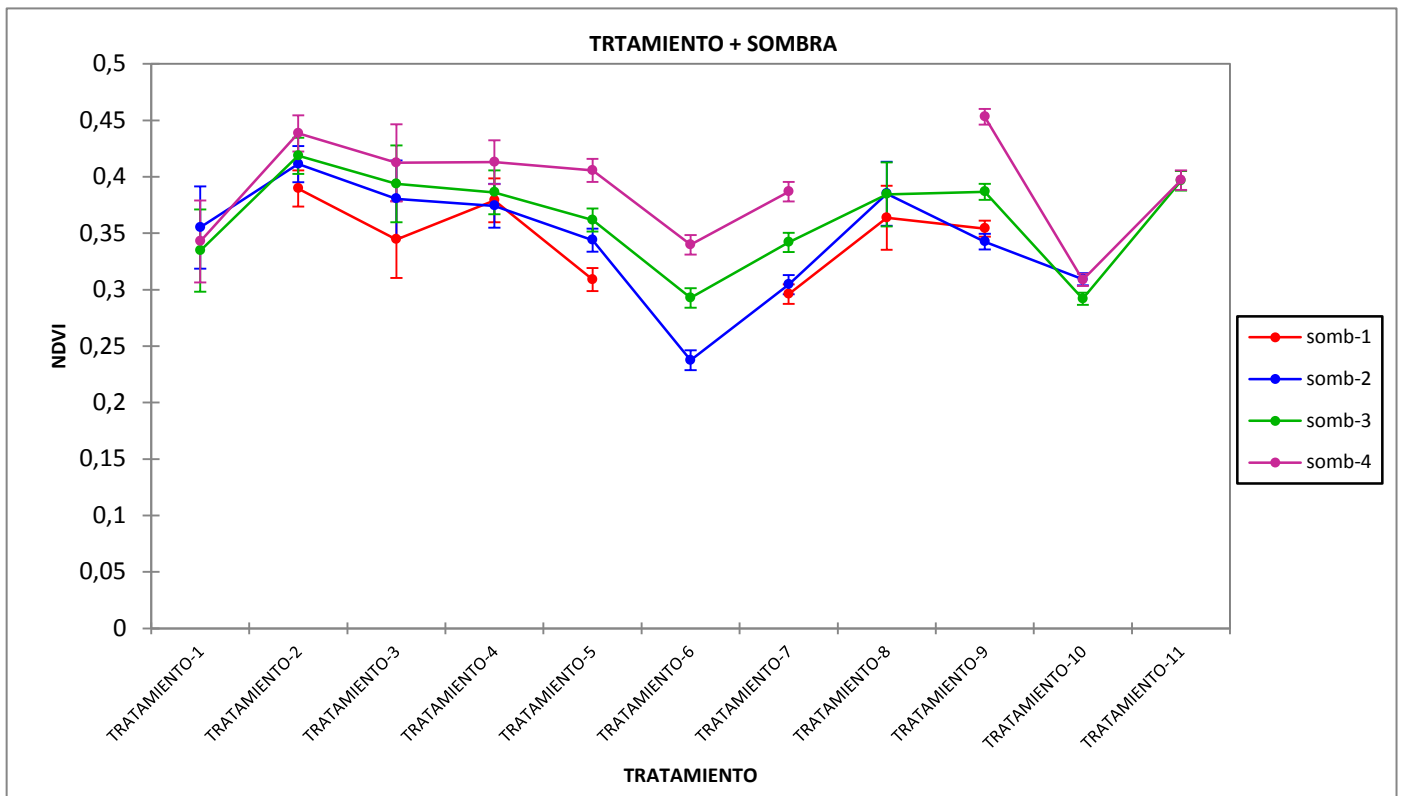


Figura 21: Correlación entre tratamiento + sombra y NDVI

1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286,  
7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado, 11 = Apeo

Como es de esperar, los valores de NDVI son más altos en las zonas con menor valor de iluminación (somb-4) por lo que se ha comprobado que no es un factor relevante, sino que, los cambios devienen del tipo de tratamiento. Los cuatro niveles de sombra siguen el mismo patrón sin apenas haber diferencia entre ellos.

No encontramos grandes diferencias considerando las interacciones con la variable altura. Esto en gran parte se relaciona con el hecho de que la zona no presenta diferencias hipsométricas muy destacadas. En este gráfico se observa los valores de NDVI que se dan en los diferentes tratamientos dependiendo la altura en la que se encuentre.

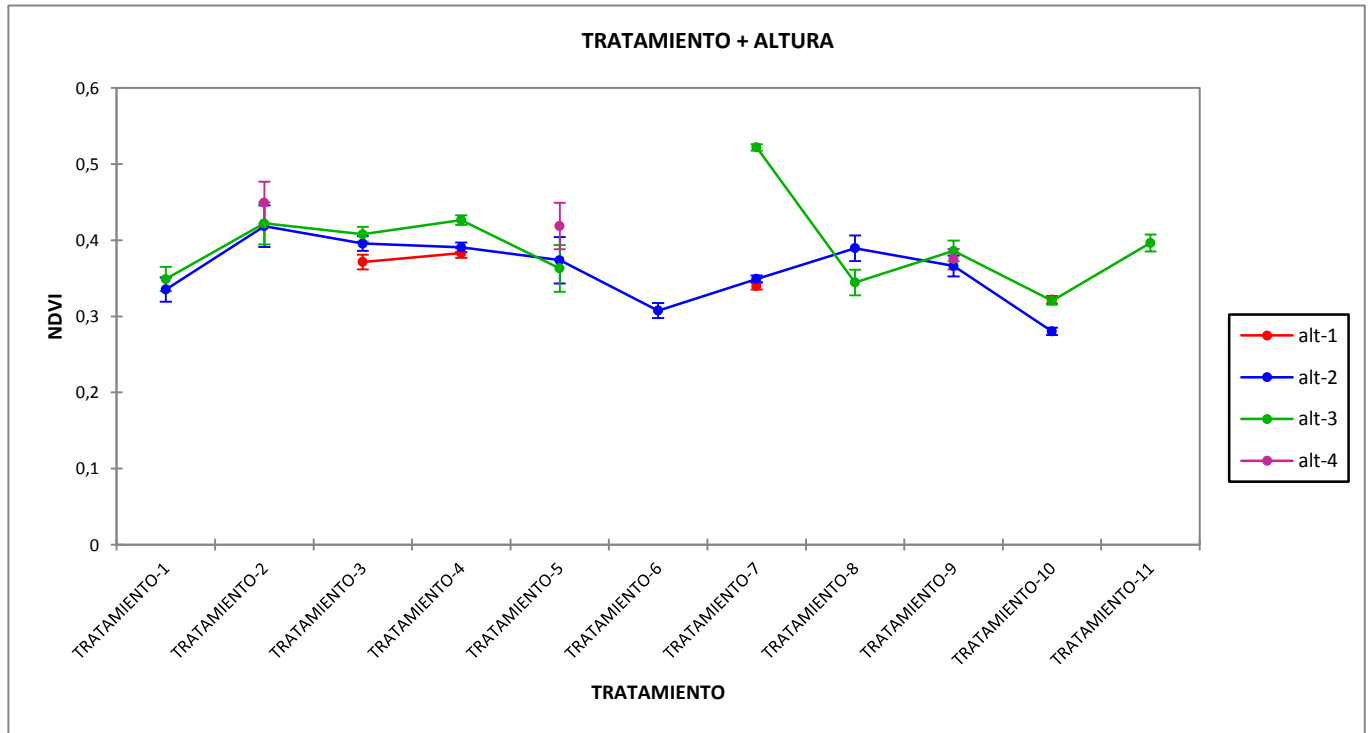


Figura 24: Correlación entre tratamiento + altura y NDVI

1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286,  
7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado, 11 = Apeo

Sin embargo, la altura, como se observa en la Figura 24, sí podría ser un factor relevante ya que las zonas con más altas con el tratamiento A-149 correspondiente al ayuntamiento de Luna, presentan mayores valores medios de NDVI ( $>0.4$ ), como se ha comprobado en apartados anteriores. Las zonas con menor altura son las que muestran valores de NDVI más reducidos, mientras que las áreas con los valores más altos (alt-3 y alt-4) presentan los mayores valores de NDVI.

El tratamiento A-286 correspondiente al municipio de Ejea, se encuentra en una zona sin una altura considerable, por lo que, presenta los valores más bajos de NDVI ( $\sim 0.3$ ), salvo por el método de Ahoyado, que independientemente de su altura tiene los valores más bajos.

Como ocurre en la Figura 21, la vegetación se adapta a las características físicas del terreno, como la pendiente, pero en este caso no de forma natural, si no después de aplicar los tratamientos post-incendio.

En este gráfico se observa los valores de NDVI que se dan en los diferentes tratamientos post-incendio dependiendo del grado de pendiente en el que se encuentran.

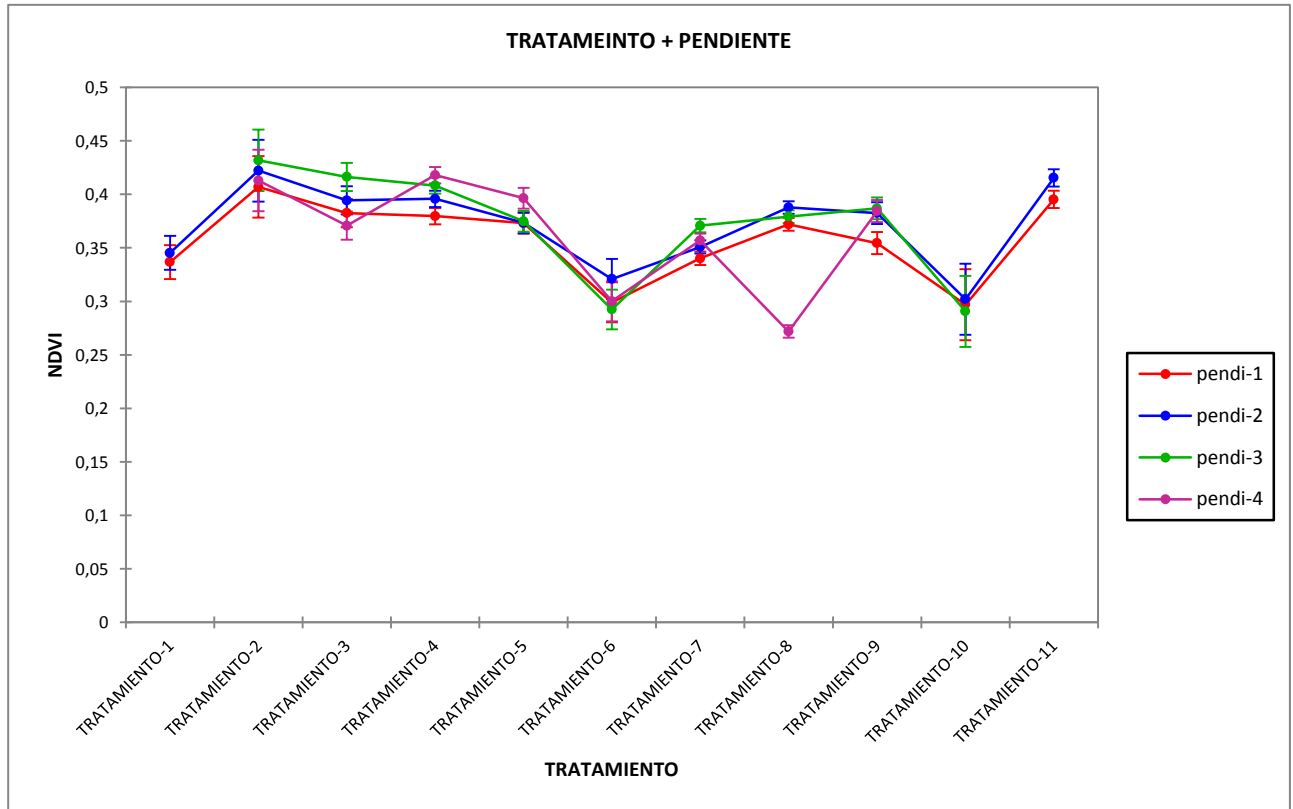


Figura 25: Correlación entre tratamiento + pendiente y NDVI

1 = Tajo, 2 = A-149, 3 = A-150\_8, 4 = A-150\_9, 5 = A-164, 6 = A-286,  
7 = A-304, 8 = trata-selv, 9 = Fajina, 10 = Ahoyado 11 = Apeo

En la Figura 25, se muestran gráficamente las interacciones entre categorías de pendiente topográfica y los tratamientos; los valores más altos de NDVI se recogen en aquellas áreas donde la pendiente es más baja, correspondiente a las líneas roja y azul. En este caso, los valores más altos de NDVI se dan en las zonas con mayor pendiente (correspondiente a las líneas verde y morada), esto se debe a que son las zonas donde antes se ha intervenido tras el incendio para frenar la erosión. Una de las formas es a través *fajinas* y de la replantación de árboles por parte de los ayuntamientos, esto explica sus altos valores en estas zonas.



## 6 Consideraciones finales y conclusiones.

---

Tras el incendio forestal, sucedido en el municipio de Luna en julio de 2015, el Gobierno de Aragón puso en marcha diferentes medidas y actuaciones de carácter hidrológico-forestal (restauración de la cubierta vegetal, actuaciones de corrección hidrográfica) con el fin de proteger el suelo de los agentes externos y favorecer el crecimiento de la vegetación con la mayor celeridad, facilitando, al mismo tiempo, en algunos montes específicos distribuidos en el área quemada, cierto aprovechamiento maderero de los restos calcinados con potencial comercial.

En este sentido, no todas las actuaciones aplicadas han tenido los mismos efectos. En términos generales, las zonas en las que se ha decidido realizar apeos registran buenos resultados; el tratamiento A-149 (apeo aplicado en el MUP 149 -Rompesacos) es el que recoge los valores promedio más elevados en términos de NDVI.

Según los análisis obtenidos en este TFG, otras de las actuaciones con mejores resultados ha sido la creación de Fajinas. Estas infraestructuras se colocaron como método de contención para impedir la erosión del suelo, reduciendo sobre todo el papel que tiene la pendiente en la reactivación geomorfológica y mejorando las condiciones edáficas para la revegetación natural.

La vegetación anterior al incendio es un factor clave a la hora de la recuperación de la masa forestal. Donde encontrábamos pinares tanto de pino salgareño como de carrasco, la recuperación de la vegetación, en términos de NDVI, ha tenido un mayor éxito. Como ya se ha comentado, son especies que suelen germinar después de un incendio con estrategias reproductivas muy eficaces respecto al fuego y, sobre todo, al de alta intensidad como el que nos ocupa. Esto sumado a la acción del hombre por recuperar estas zonas y evitar la erosión, hacen que las zonas de pinares y que además se encuentran en zonas de pendiente sean las que mejores resultados hayan obtenido.

La pendiente topográfica también desempeña un papel importante en la regeneración natural. Por ejemplo, en las zonas en las se aplicó el tratamiento *trata-selv* (apeo y desramado y dejarlo *in situ*), las áreas con más pendiente son las que peor regeneración han tenido. En las demás zonas con pendientes medias-altas y altas los tratamientos que se han llevado a cabo, como la replantación y contención del suelo, si han supuesto mejoras en la recuperación de los valores de NDVI.

Las mejores condiciones para el crecimiento de la masa forestal se corresponden con las laderas de orientación norte, debido a la mayor disponibilidad de humedad para la regeneración de la vegetación. Además, esta regeneración vegetal es más efectiva en zonas con pendiente, y en las que se han realizado a las correspondientes actuaciones para que se mantenga la vegetación, ya sea de forma natural o por repoblación.

En resumen, la realización de este estudio ha permitido llevar a cabo los objetivos previstos, centrados en el diagnóstico de los diferentes tratamientos en términos de regeneración vegetal analizada mediante índices espectrales. Gracias al uso de las herramientas de Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ha podido realizar una comparación y análisis de los tratamientos post-incendio usando los índices NDVI y NBR. Se han encontrado diferencias entre los distintos tipos de tratamiento aplicados. Al mismo tiempo, se comprueba que, además del tipo de tratamiento aplicado, las características físicas del terreno son relevantes en muchos casos para reactivar o inhibir el crecimiento de la vegetación.

Los datos obtenidos desvelan que una rápida actuación en las zonas afectadas puede resultar clave para evitar la erosión del suelo y facilitar la evolución natural de la vegetación. En las zonas donde se han realizado actuaciones con Fajinas o apeos para la extracción de la madera quemada por parte de maderistas, si bien es cierto que en muchos casos no llegaron a realizarse de manera artificial, los resultados han sido claramente más efectivos.

La vegetación previa al incendio es un factor clave, debido a que, ciertas especies vegetales tienen una gran capacidad para reponerse tras un incendio. Por ello, las zonas, en las que antes del incendio había formaciones de pinar de carracos han resultado las más favorecidas tras la realización de las actuaciones.

En el momento de gestionar qué tratamiento se iba a realizar en las zonas afectadas, se priorizó el trabajo sobre las áreas más devastadas tras el incendio. Estas zonas pertenecían al municipio de Luna y Orés. Los primeros esfuerzos de desbroce y apeo comenzaron en estas zonas, lo que, supuso que el desarrollo de la vegetación fuera más rápido que en otras menos afectadas.

Este análisis y evaluación de los resultados podría ayudar en futuras actuaciones post-incendio, en lugares con ciertas características similares en cuanto al relieve y la vegetación, lo cual, puede ser útil a la hora de minimizar los riesgos de erosión, escorrentía y favorecer la regeneración natural vegetal.

# 7 Referencias

---

## BIBLIOGRAFÍA

Álvarez Rogel, Y. (2001). Evolución histórica de los incendios forestales en España.

Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledetección*, (49), 49-61.

Centro de Coordinación de la Información Nacional de Incendios Forestales (CCINIF)

Chuvieco, E. (2009). *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Berlin.

Domingo-Ruiz, D., Lamelas-Gracia, M. T., Montealegre-Gracia, A. L., & de la Riva-Fernández, J. (2016). Estimación de la pérdida de biomasa y de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la combustión de masas forestales de *pinus halepensis* mill. En el incendio del municipio de Luna (Aragón), mediante datos LiDAR-PNOA.

Espelta, J. M., Arnan, X., Verkaik, I., & Guitart, L. (2008). Evaluación ecológica de diferentes tratamientos silvícolas de mejora de la regeneración natural en zonas afectadas por incendio y sequías extremas. *Modelos silvícolas en montes privados mediterráneos*, 153.

Gelabert V. P. (2017) Análisis de la diversidad estructural en paisajes dinámicos afectados por incendios forestales mediante LIDAR-PNOA,

Gobierno de Aragón, (2015).Informe oficial del incendio en el municipio de Luna.

Guillem-Cogollos, R., Vinué-Visús, D., Caselles-Miralles, V., & Espinós-Morató, H. (2017). Estudio crítico de los índices de severidad y la superficie afectada por el incendio de Sierra de Luna (Zaragoza).

Iberpix4. Instituto Geográfico Nacional (IGN)

J. Benito, (2013) Buenas prácticas, municipio de Luna, empresa Gestamp Aragón S.A.

KEY C & N BENSON (2002) Remote sensing measure of severity, the normalized burn ratio. Fire effects monitoring and inventory protocol, landscape assessment. Retrieved March 30, 2003 from Systems for Environmental Management and USDA Fire Sciences Laboratory, Rocky Mountain Research Station

Madrigal, J., Martínez Herranz, E., Hernando, C., Gujarró, M., Díez, C., Vega, J. A., ... & Beloso, M. C. (2004). Respuesta a corto plazo del regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. a claros mecanizados intensos. *Silva Lusitana*, 12(1), 1-14.

Ministerio de transición ecológica (MITECO), (2015) Banco de datos de incendios forestales.

Ministerio de transición ecológica (MITECO), (2007) Inventario forestal de Aragón.

Peña, M. A., & Ulloa, J. (2017). Mapeo de la recuperación de la vegetación quemada mediante la clasificación de índices espectrales pre-y post-incendio. *Revista de Teledetección*, (50), 37-48.

Ruano, A. J. (2013). Trabajo Fin de Máster. Aplicabilidad de las imágenes MODIS para la caracterización de zonas afectadas por incendios forestales en Aragón.

Salinero, E. C. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-182.

Skypnychuk (2016). Análisis de la severidad y la regeneración vegetal mediante imágenes de satélite en el incendio de Sierra de Luna (2015)

Vani, V. y Mandla, VR (2017). Estudio comparativo de los índices de vegetación NDVI y SAVI en las zonas semiáridas del distrito de Anantapur. *Revista Internacional de Ingeniería Civil y Tecnología*, 8 (4), 287-300.

Vidal, P., De Santis, A., Pérez, W., & Honeyman, P. (2017). Uso de herramientas de teledetección para el análisis de la severidad y estimación de gases de efecto invernadero (GEI) en incendios forestales de gran magnitud. Estudio de caso incendio La Rufina, VI Región del LGB O'Higgins, Chile. *Revista de Teledetección*, (50), 59-69.

WWF España y Fundación AXA. (2014). Los bosques después del fuego.

WWF y fundación banco Santander. (2008). Manual de desarrollo sostenible.

WWF. (2012). Restauración de zonas quemadas.

## WEBGRAFÍA

Agencia espacial europea (ESA)  
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/observation-scenario>

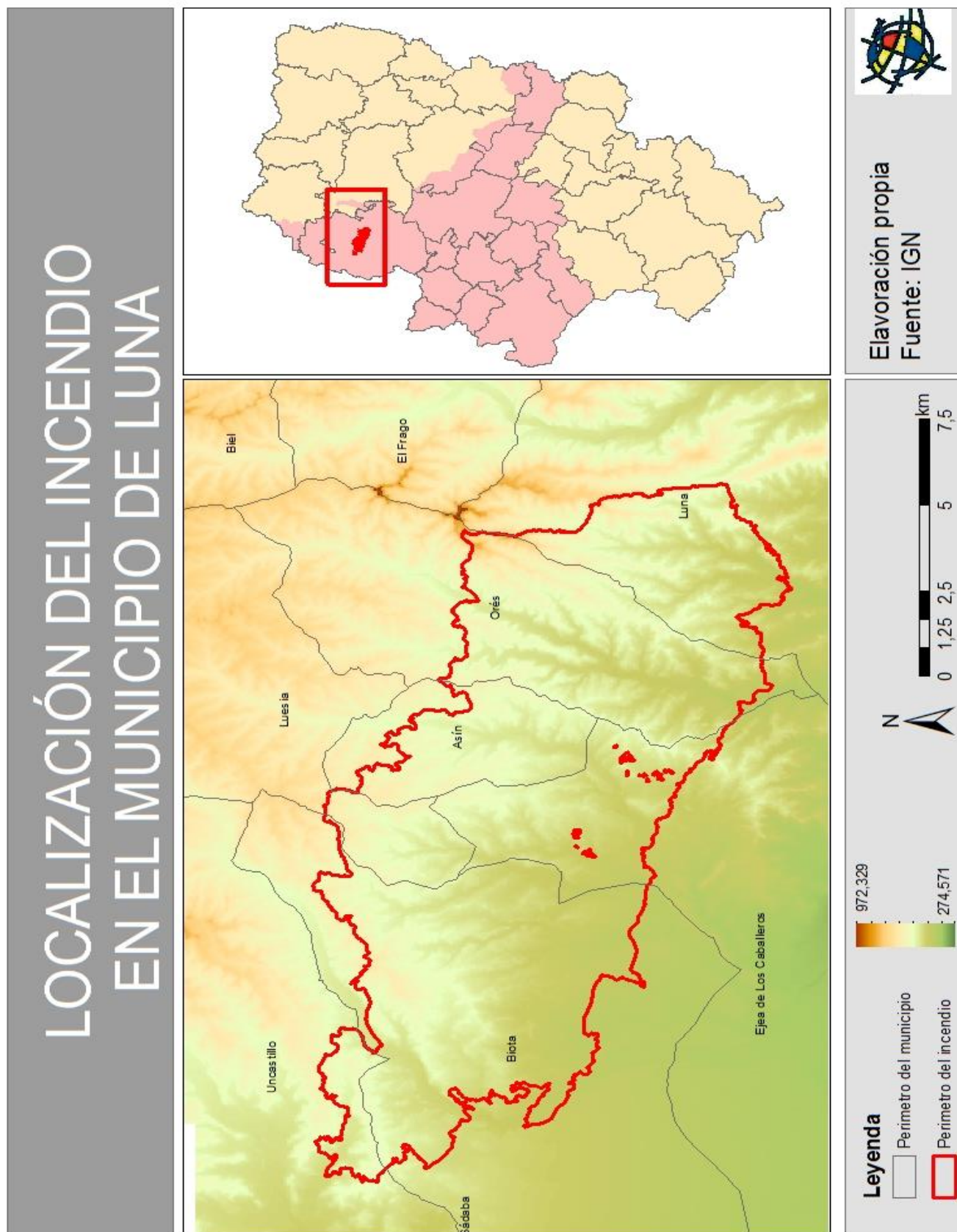
Climate-Data.org <https://es.climate-data.org/europe/espana/aragon/luna-285366/>

Geoinnova, A. Martorell, (2016) <https://geoinnova.org/blog-territorio/ndvi-indice-vegetacion/>

## 8 Anexos

### Anexo 1

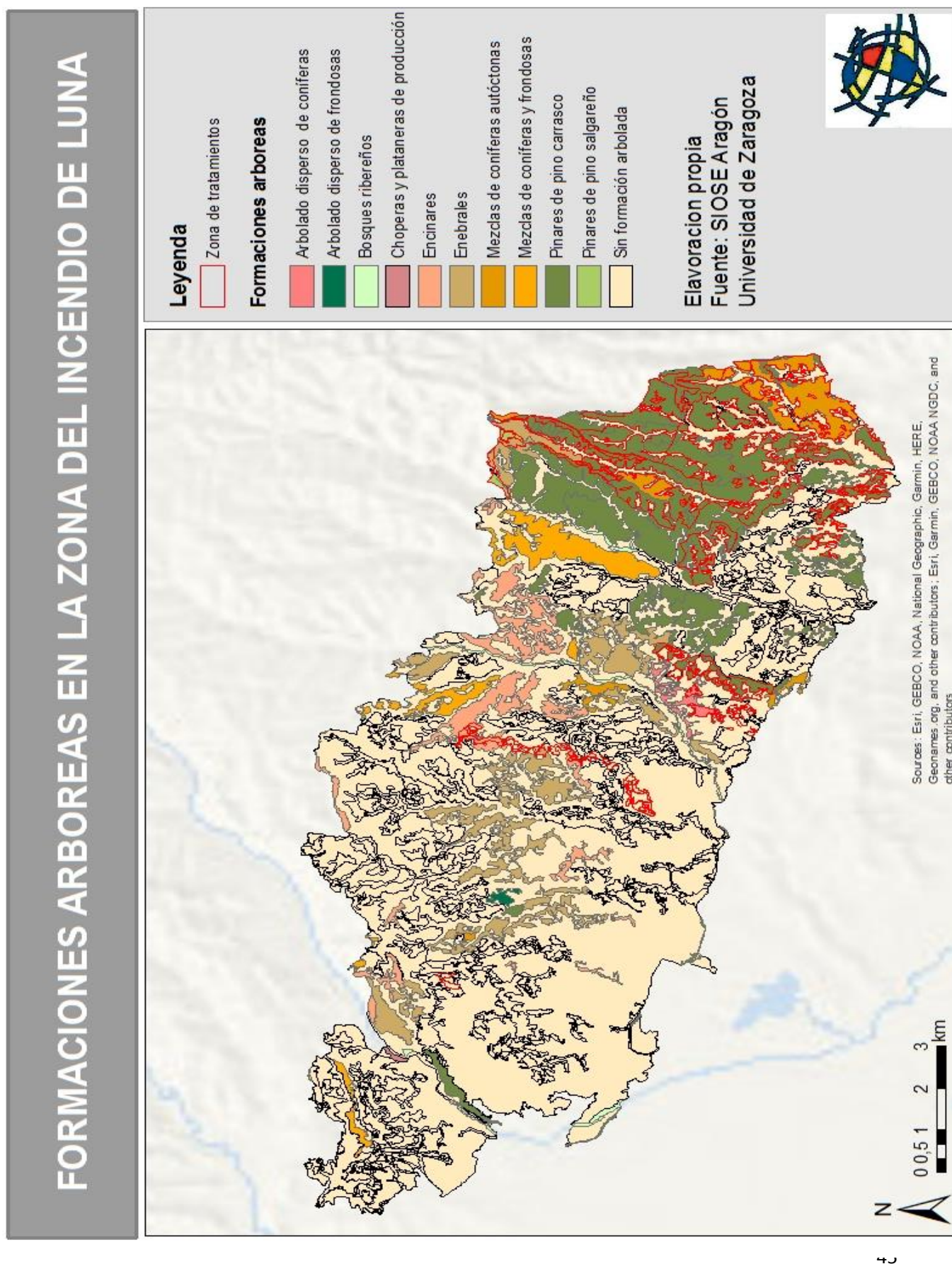
Figura 1: Localización del incendio de Luna 2015





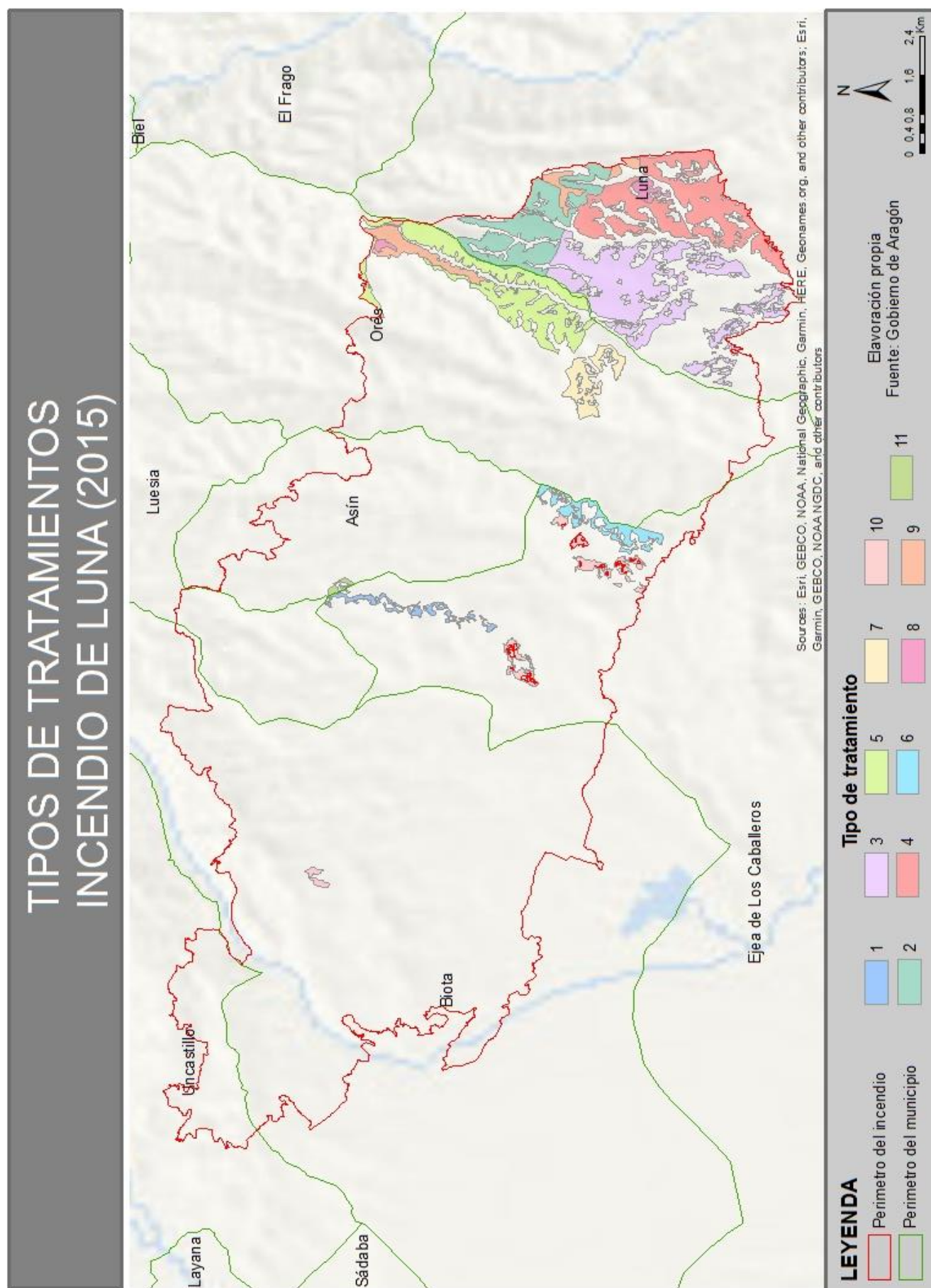
## Anexo 2

Figura 4: Formaciones arbóreas en la zona de estudio



### Anexo 3

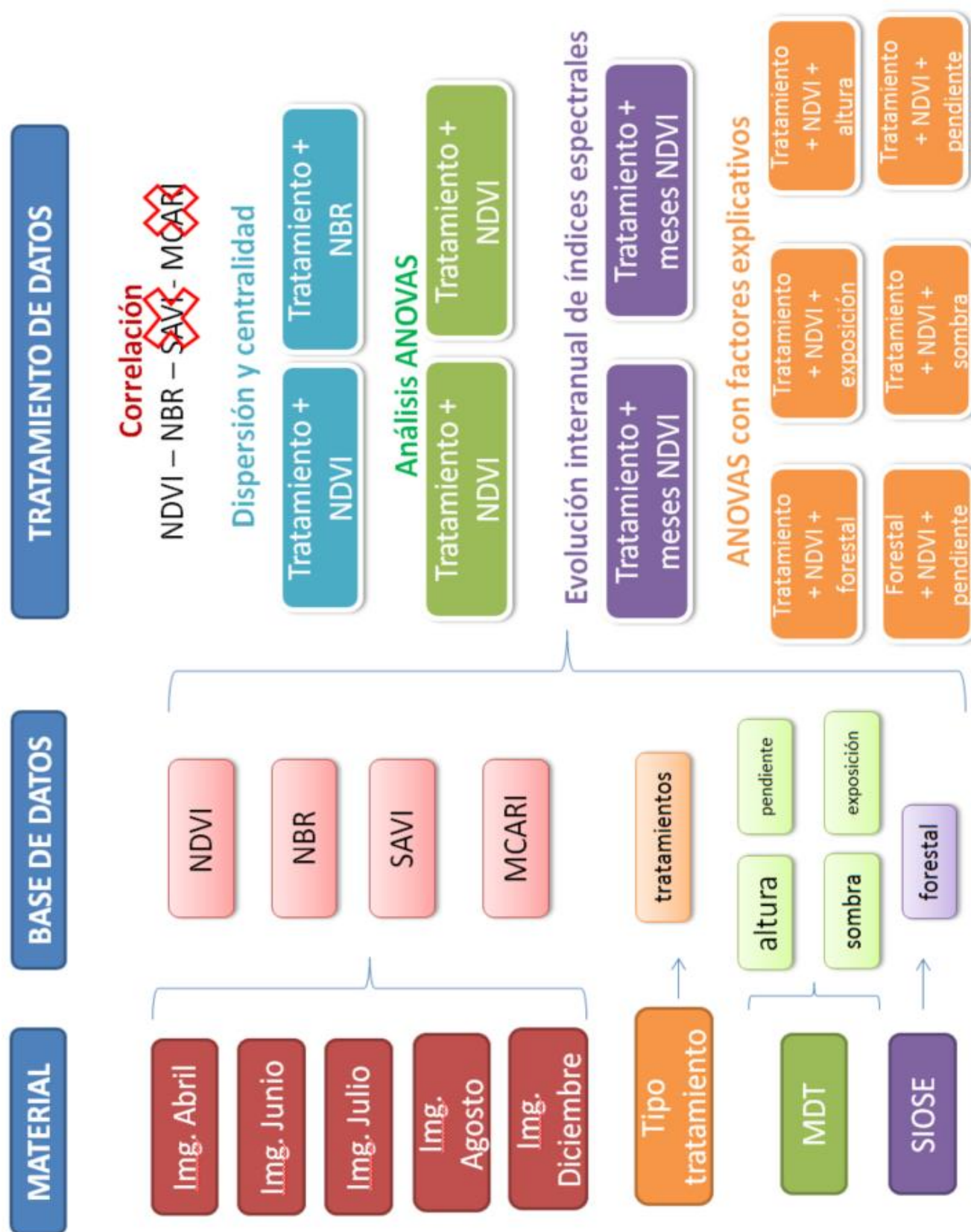
Figura 6: Tipos de tratamientos post-incendio





## Anexo 4

Figura 9: Esquema metodología





**Anexo 5**

Figura 10: características principales del sensor Sentinel-2

<b>Nº DE BANDA</b>	<b>LONGITUD DE ONDA (nm)</b>	<b>RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)</b>
2	490	10
3	560	10
4	650	10
8	842	10
5	705	20
6	740	20
7	783	20
8	865	20
11	1610	20
12	2190	20
1	443	60
9	940	60
10	1375	60

## Anexo 6

Correlación entre los factores explicativos de sombra, altura, pendiente y exposición.

Variables	SOMBRA	ALTURA	EXPOSICION	PENDIENTE
SOMBRA	0	0,470	0,000	0,099
ALTURA	0,470	0	0,616	0,857
EXPOSICION	< 0.0001	0,616	0	0,201
PENDIENTE	0,099	0,857	0,201	0

Alta correlación entre los valores de exposición y sombra.